



UNIVERSITAS INDONESIA

Analisa Kurva Aliran Fluida dengan Menggunakan
Piezoactuator Pelat Miring

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

Raja Humala JR

0606077863

FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK PERKAPALAN
DEPOK

JANUARI 2011

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

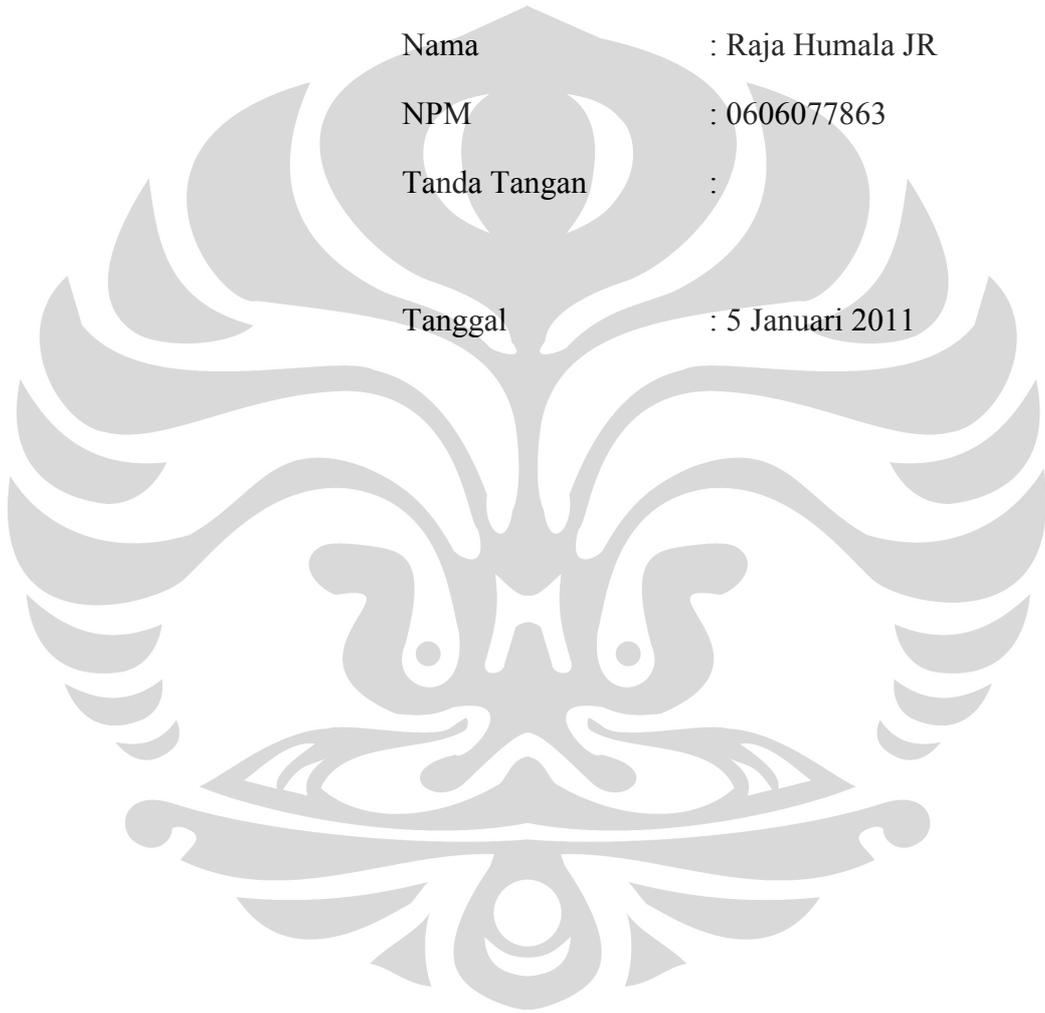
Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Raja Humala JR

NPM : 0606077863

Tanda Tangan :

Tanggal : 5 Januari 2011



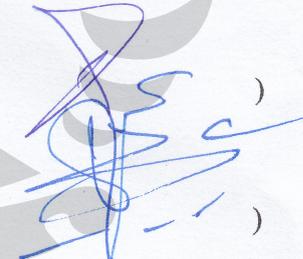
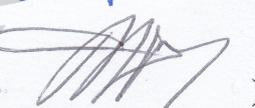
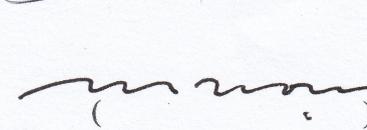
HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Raja Humala JR
NPM : 0606077863
Program Studi : Teknik Perkapalan
Judul Skripsi : Analisa Kurva Aliran Fluida dengan Menggunakan Piezzoactuator Pelat Miring

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Yanuar, M.Sc, M. Eng ()
Penguji : Ir. Sunaryo, Ph.D ()
Penguji : Ir. M. A. Talahatu, M.T ()
Penguji : Ir. Hadi Tresno Wibowo ()
Penguji : Ir. Mukti Wibowo ()

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT, atas berkat rahmat dan karunia-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini tepat waktu. Penulisan skripsi ini dilakukan untuk memenuhi salah satu syarat mencapai gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Perkapalan pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Yanuar, M.Sc, M. Eng selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan penulis dalam penyusunan skripsi ini.
2. Ir. Sunaryo, Ph.D, Ir. M. A. Talahatu, M.T, Ir. Hadi Tresno Wibowo, Ir. Mukti Wibowo selaku dosen pada program studi Teknik Perkapalan yang telah membimbing selama kuliah di Program Studi Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.
3. Orang tua dan kakak yang telah memberikan dukungannya sehingga skripsi ini terselesaikan.
4. Eldwin Dipta Widyasa yang sangat menolong dalam penelitian hingga selesai.
5. Kawan-kawan saya di kanteck sebagai teman kuliah, teman berbagi cerita, teman main kartu dll, semoga pertemanan kita akan terus berlanjut.
6. Permata GBKP DELA, yang memberi dukungan kepada saya untuk menyelesaikan penelitian ini.
7. Anak Mesin, kepada para senior yang telah membimbing dan kepada junior yang telah membantu penulisan ini hingga selesai.

Akhir kata, semoga TUHAN Yang Maha Esa berkenan membalas kebaikan semua pihak yang telah disebutkan di atas. Semoga skripsi ini membawa manfaat untuk perkembangan ilmu pengetahuan.

Depok, Januari 2011

Raja Humala JR

HALAMAN PERNYATAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR
UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Raja Humala JR

NPM : 0606077863

Program Studi : Teknik Perkapalan

Departemen : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non-exclusive Royalty-Free Rights) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**Analisa Kurva Aliran Fluida Dengan Menggunakan
Piezoactuator Pelat Miring**

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan hak bebas royalti noneksklusif ini, Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 5 Januari 2011

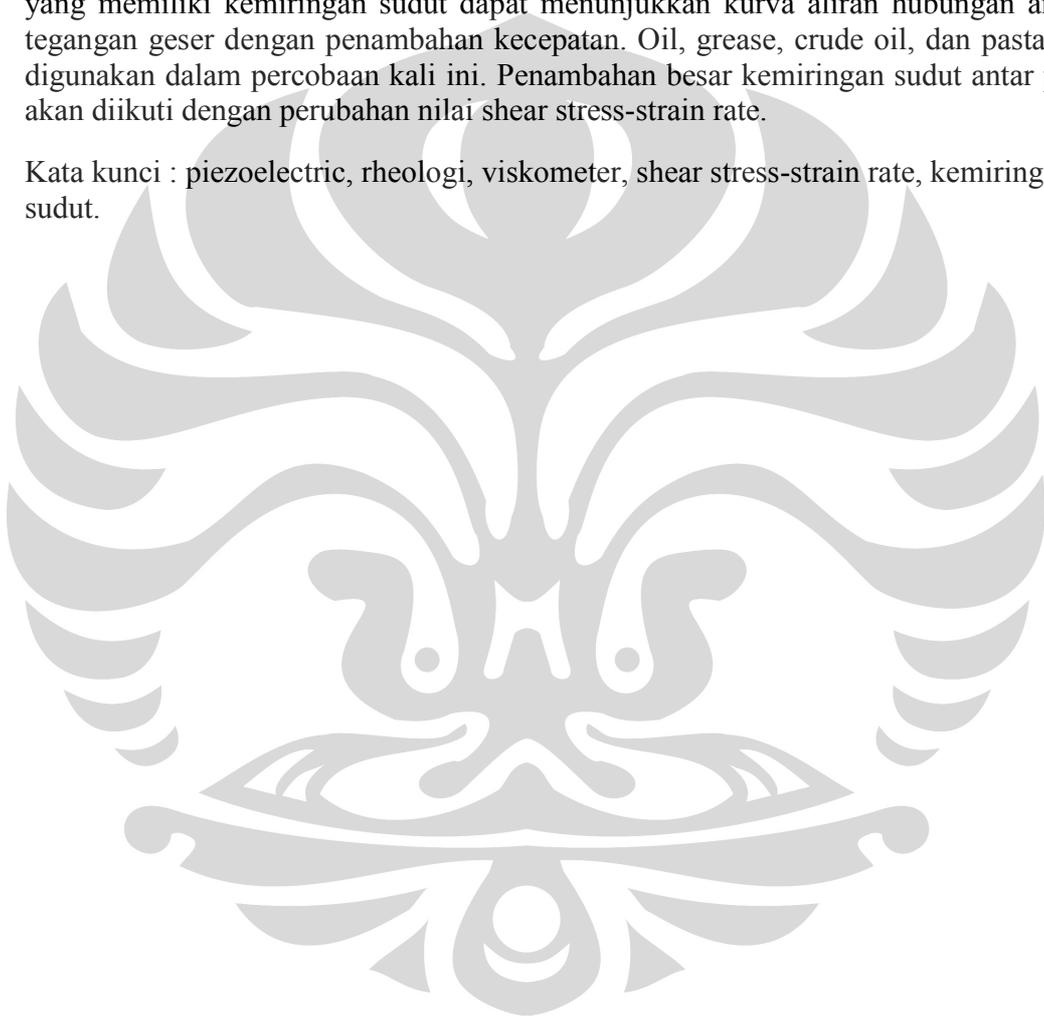
Yang menyatakan

Raja Humala JR

Abstrak

Sistem aliran pada mesin atau kapal sangat kompleks dan banyak jenis fluida yang digunakan. Kekentalan fluida, jenis fluida, dan kecepatan alir adalah komponen yang mempengaruhi pemakaian energy seperti pada sistem aliran. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik fluida (rheologi) saat diberi gaya penekanan dan penarikan dengan menggunakan viskometer. Jenis Viskometer yang digunakan harus disesuaikan dengan kekentalan fluida uji. Piezoelectric viskometer dengan pelat yang memiliki kemiringan sudut dapat menunjukkan kurva aliran hubungan antara tegangan geser dengan penambahan kecepatan. Oil, grease, crude oil, dan pasta gigi digunakan dalam percobaan kali ini. Penambahan besar kemiringan sudut antar pelat akan diikuti dengan perubahan nilai shear stress-strain rate.

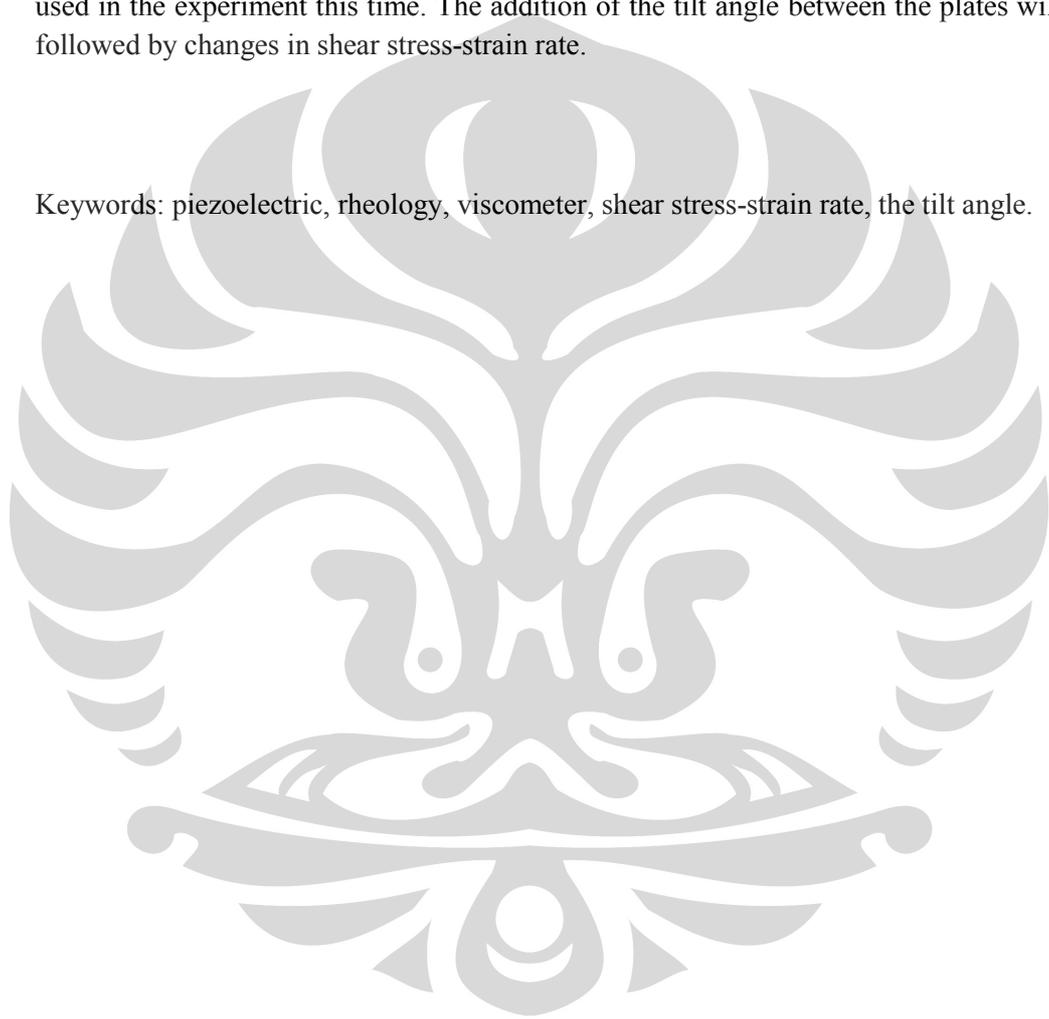
Kata kunci : piezoelectric, rheologi, viskometer, shear stress-strain rate, kemiringan sudut.



Abstract

Flow system on a machine or vessel is very complex and many types of fluid used. Fluid viscosity, fluid type and flow rate are the components that affect energy consumption such as the flow system. The purpose of this study was to determine the fluid characteristics (rheological) when given the emphasis on style and withdrawal by using a viscometer. Type Viscometer used must be adapted to test the fluid viscosity. Piezoelectric plate viscometer with a tilt angle to show the relationship between the flow curve of shear stress with the addition of speed. Oil, grease, crude oil, and toothpaste are used in the experiment this time. The addition of the tilt angle between the plates will be followed by changes in shear stress-strain rate.

Keywords: piezoelectric, rheology, viscometer, shear stress-strain rate, the tilt angle.



DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	i
PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	iv
ABSTRAK	v
ABSTRAC	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Metodologi Penelitian	3
1.6 Sitematika Penulisan	4
BAB II LANDASAN TEORI	
2.1 Fluida ElectroRheological	6
2.2 Piezo-electricity	8
2.3 Squeeze Flow	9
BAB III RANCANGAN ALAT	
3.1 Spesifikasi Komponen	11
3.2 Detail Rancangan Alat	13
3.3 Langkah Piezoactuator Setting	14

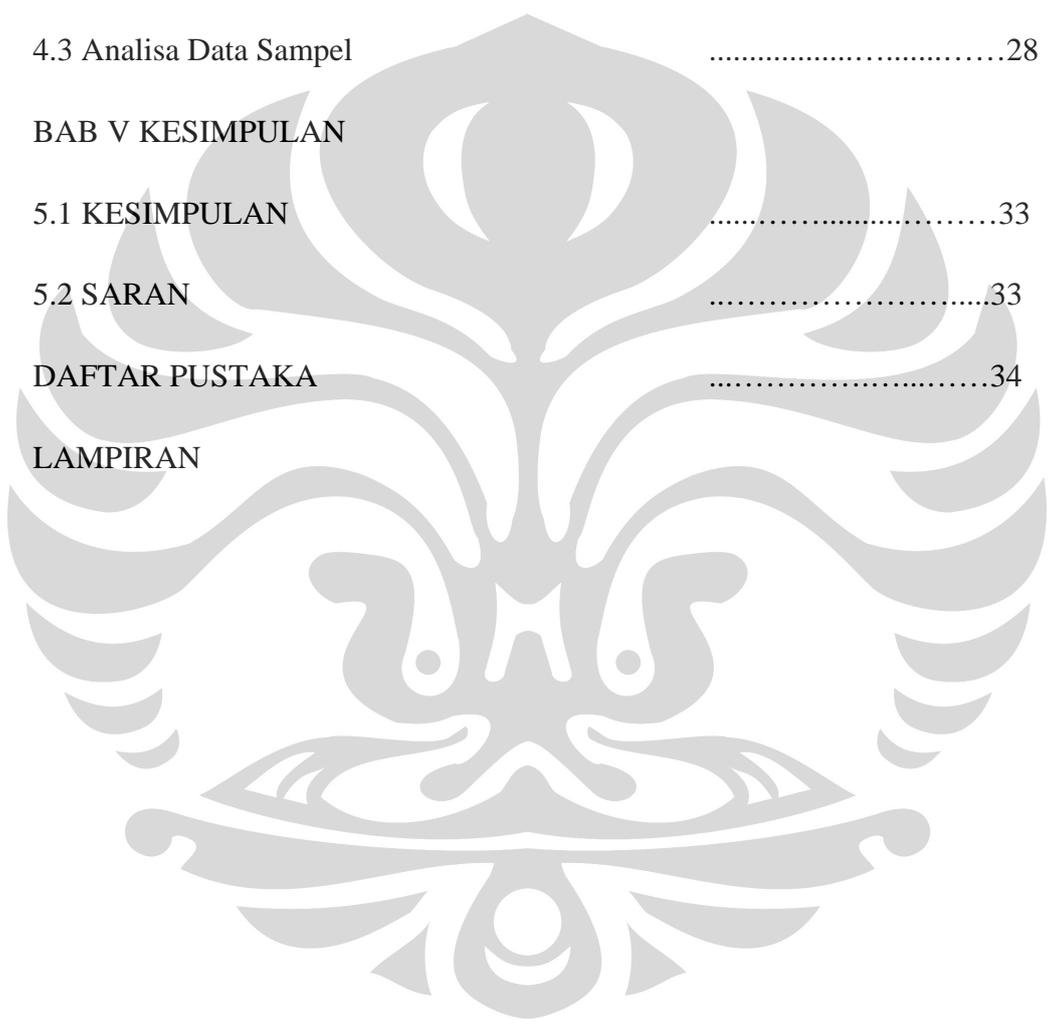
BAB IV METODE PENGAMBILAN DATA DAN ANALISA

4.1 Proses Pengambilan Data17
4.2 Pengolahan Data25
4.3 Analisa Data Sampel28

BAB V KESIMPULAN

5.1 KESIMPULAN33
5.2 SARAN33
DAFTAR PUSTAKA34

LAMPIRAN



DAFTAR GAMBAR

- 1) Gambar 1.1 Posisi Fluida Pada Pelat Datar
- 2) Gambar 1.2 Eksperimen Dengan Pengatur Jarak Antar Pelat
- 3) Gambar 2.1 Karakteristik Fluida
- 4) Gambar 2.2 Ilustrasi Instalasi Piezo-actuator
- 5) Gambar 2.3 Ilustrasi Peletakan Fluida Sampel
- 6) Gambar 2.4 Aplikasi Sudut Pada Fluida Sampel
- 7) Gambar 3.1 Piezo-actuator
- 8) Gambar 3.2 Load Cell
- 9) Gambar 3.3 Laser OMRON ZX-Series
- 10) Gambar 3.4 Pelat Dengan Berbagai Sudut
- 11) Gambar 3.5 Amplifier
- 12) Gambar 3.6 Actuator
- 13) Gambar 3.7 Interface
- 14) Gambar 3.8 PC
- 15) Gambar 3.9 Pemasangan Piezo-actuator
- 16) Gambar 3.10 Skema Instalasi Alat Eksperimen
- 17) Gambar 3.11 Pemasangan Kabel Pada Interface
- 18) Gambar 3.12 Pemasangan Kabel Pada Piezo-actuator
- 19) Gambar 3.13 Pemasangan Kabel antara Piezo-actuator Dengan Drive-actuator
- 20) Gambar 4.1 Setting Software
- 21) Gambar 4.2 Setting Software
- 22) Gambar 4.3 Setting Software
- 23) Gambar 4.4 Setting Software
- 24) Gambar 4.5 Setting Software
- 25) Gambar 4.6 Setting Software
- 26) Gambar 4.7 Setting Software
- 27) Gambar 4.8 Setting Software
- 28) Gambar 4.9 Setting Software
- 29) Gambar 4.10 Setting Software
- 30) Gambar 4.11 Setting Software
- 31) Gambar 4.12 Setting Software

- 32) Gambar 4.13 Setting Software
- 33) Gambar 4.14 Setting Software
- 34) Gambar 4.15 Setting Software
- 35) Gambar 4.16 Setting Software
- 36) Gambar 4.17 Hasil Data Yang Diperoleh
- 37) Gambar 4.18 Grafik 1000 Hz Fluida Sampel
- 38) Gambar 4.19 Grafik Sudut kemiringan pelat – Shear Stress Fluida Sampel Pada 1000 Hz
- 39) Gambar 4.20 Grafik Shear Stress-Strain Rate Crude Oil
- 40) Gambar 4.21 Grafik Shear Stress-Strain Rate Oil
- 41) Gambar 4.22 Grafik Shear Stress-Strain Rate Pasta Gigi
- 42) Gambar 4.23 Grafik Shear Stress-Strain Rate Grease A
- 43) Gambar 4.24 Grafik Shear Stress-Strain Rate Grease B



BAB I

PENDAHULUAN

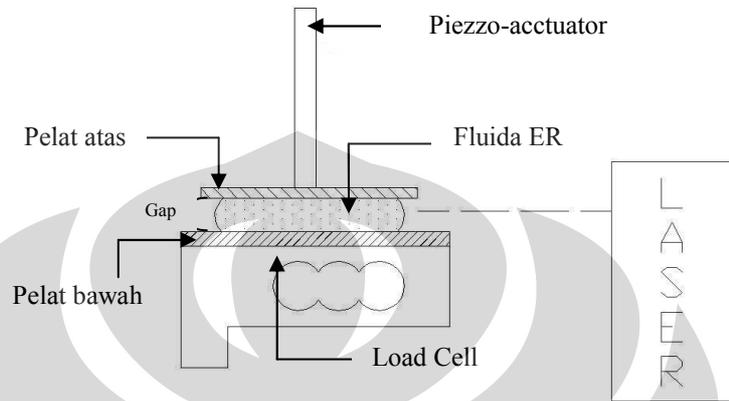
1.1 Latar Belakang

Krisis energi yang melanda dunia belakangan ini menjadi tren hangat yang sering dibicarakan semua orang. Penelitian-penelitian mengenai penghematan energi dan energi yang dapat diperbarui terus dilakukan guna mengatasi krisis energi tersebut. Hal ini juga merambah masuk dan mempengaruhi pemakaian energi dalam dunia perkapalan. Banyak sistem dalam kapal yang berjalan secara terus menerus yang akan membutuhkan banyak energi, seperti sistem sirkulasi minyak atau *grease*, sehingga penghematan pemakaian energi termasuk salah satu aspek yang sangat penting. Oleh karena itu, menarik untuk diteliti mengenai sifat-sifat karakteristik fluida dalam sistem pelumasan tersebut.

Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk mengetahui karakter aliran suatu fluida dan energi yang dibutuhkan untuk mengalirkannya adalah dengan cara mengetahui nilai kekentalan fluida tersebut dimana bukan hanya karena dipengaruhi oleh suhu tetapi juga dikarenakan pengaruh dari kecepatan aliran fluida tersebut.

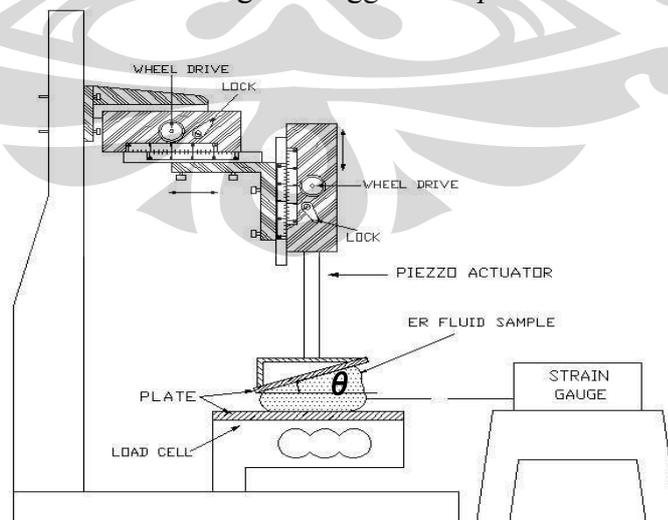
Untuk mengetahui kekentalan fluida cair, seperti air, bensin, minyak tanah, sering digunakan Viskometer pipa kapiler. Sedangkan untuk fluida yang memiliki kekentalan 20x dari air digunakan Rotary coaxial viscometer yang jenisnya beragam. Pada penelitian Tugas Akhir yang kami lakukan, kami melihat karakter fluida tersebut dengan bantuan alat *piezzo-actuator* dimana yang menarik dalam alat yang kami gunakan adalah pemberian tekanan yang sangat kecil pada fluida sampel (berupa getaran, sehingga cocok untuk pelumasan). *Piezzo actuator* ini bukan merupakan barang baru di dunia rheologi, tetapi belum banyak diteliti di Indonesia. Dalam beberapa jurnal yang telah penulis baca sebagai bahan literatur, umumnya alat ini diletakkan secara vertikal diatas sebuah pelat datar dimana pelat datar ini akan menyentuh fluida sampel yang akan diuji diatas sebuah pelat lain

yang terkoneksi dengan *load cell* [gambar 1]. Fluida sample akan mengalir dengan lambat dimana nilai $Re < 1$, atau dikenal dengan nama *quete flow*.



Gambar 1.1

Berdasarkan gambar di atas, penulis mencoba sedikit memodifikasi perlakuan yang diberikan terhadap fluida *electro-rheologi*. Kali ini penulis mencoba untuk menerapkan sudut (θ) di antara kedua buah plat paralel [gambar 1.2], dimana sudut yang coba penulis terapkan sebesar: 5° , 10° , 15° , dan 20° . Penulis pun mencoba beberapa fluida non-newtonian sebagai sample, Crude Oil, Grease type A, Grease type B, Oil dan Pasta Gigi, guna mencoba mengeluarkan grafik fungsi stress-strain rate dengan menggunakan *piezzo-acctuator*.



Gambar 1.2

1.2 Rumusan Masalah

Masih ramainya diperbincangkan mengenai kurva stress-strain rate yang dapat terbentuk dari berbagai macam fluida *electro-rheologi* dengan bantuan *piezzo actuator*. Oleh karena itu, penulisan Tugas Akhir ini diharapkan dapat membantu menjawab penggunaan *piezzo-actuator* dalam dunia *rheologi* khususnya dalam dunia perkapalan.

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penulisan Tugas Akhir ini adalah :

1. Memunculkan grafik shear stress-strain rate beberapa macam fluida non-newtonian.
2. Mengetahui pengaruh jarak antar pelat terhadap shear stress-strain rate fluida sampel.
3. Mengetahui pengaruh sudut antar pelat terhadap shear stress-strain rate fluida sampel.

1.4 Batasan Masalah

Penyusunan Tugas Akhir ini dibatasi oleh hal-hal berikut:

1. Penggunaan pelat datar dengan beragam jarak antar kedua pelat
2. Penelitian ini membandingkan shear stress-strain rate fluida sampel terhadap jarak antar pelat.

1.5 Metodologi Penelitian

Penyusunan Tugas Akhir ini menggunakan metodologi penulisan sebagai berikut:

1. Studi Literatur
Sumber yang digunakan berupa jurnal, buku, artikel.
2. Perancangan Alat
Melakukan proses perakitan alat sesuai dengan petunjuk yang ada sehingga dapat bekerja sesuai dengan yang diinginkan.

3. Proses Uji Coba

Menguji kinerja alat percobaan, termasuk modifikasi dan kalibrasi, sehingga dapat diperoleh data yang sesuai dengan harapan.

4. Pengambilan dan Pengolahan Data

Melakukan percobaan dengan *piezzo-acctuator*. Data yang diperoleh masih mentah dan masih harus diolah dengan rumus-rumus tertentu agar mendapat grafik stress-strain rate yang diinginkan.

5. Penyusunan Laporan

Semua data dan literatur dirangkum dalam satu bentuk laporan hasil penelitian.

1.6 Sistematika Penulisan

Penyusunan Tugas Akhir ini menggunakan sistematika penulisan sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Bab 1 menjelaskan tentang latar belakang, perumusan masalah, tujuan, batasan masalah, metodologi penulisan dan sistematika penulisan.

BAB II LANDASAN TEORI

Bab 2 menjelaskan tentang konsep yang menjadi dasar dari penelitian menggunakan metode *squeeze flow* dengan bantuan *piezzo-acctuator*.

BAB III RANCANGAN ALAT

Bab 3 menjelaskan tentang proses perakitan alat *Piezzo-acctuator* serta cara kerja alat tersebut.

BAB IV METODE PENGAMBILAN DATA DAN ANALISA

Bab 4 menjelaskan tentang prosedur pengambilan data dan pengolahan data dari alat dan analisa kinerja alat beserta hasilnya.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab 5 menjelaskan tentang kesimpulan yang didapat dari pembuatan alat serta saran yang berguna untuk kelangsungan penelitian berikutnya.



BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Fluida Electro-rheological

Penulis menggunakan fluida *electro-rheological* sebagai fluida sample. Fluida *electro-rheological* (ER), atau dikenal juga dengan sebutan “*smart-fluid*”, telah dipelajari secara luas untuk kegunaannya pada aplikasi dalam bidang industri, seperti *fast acting hydraulic valves*, *ER brakes*, damper, step actuator, dan lain-lain [1]. Hal ini dikarenakan oleh nilai yield stress yang dimanfaatkan oleh sebagian besar aplikasi. Bagaimana pun juga, laporan tentang shear yield stress dari fluida *electro-rheological* sering kali lebih rendah dari 10 kPa dan tidak cukup tinggi untuk dimanfaatkan pada skala aplikasi. Untuk merancang *electro-rheological* aktuator dengan kemampuan gaya, kekuatan tarik dan tekanan yang lebih tinggi telah diselidiki akhir-akhir ini. Kekuatan tarik dan kekuatan tekan telah diketahui lebih tinggi dari shear yield stress [2]. Monkman telah menyelidiki efek fluida *electro-rheological* dibawah tekanan [3]. Vieira *et al* telah menguji coba tekanan kompresi, tensile yang berhubungan dengan ER fluid yang dipengaruhi oleh partikel karbon dan *silicon oil* [4]. Gong dan lim telah melakukan percobaan terkait dengan tensile dan kompresi dari kandungan ER fluid yang ditambahkan dengan fiber glass [5]. Lee dan pekerjanya telah mempelajari suspensi ER yang dibuat dari partikel silica dan silikon oil dibawah *squeeze-flow* dengan merubah medan elektrik yang ada, kepekatan dari *host oil* dan partikel air terkandung [6]. Noresson dan ohlson telah melaporkan studi mendalam mengenai model bingham dalam mode *squeeze-flow*, yang menunjukkan bahwa ketergantungan amplitudo dan frekuensi tidak diprediksi dengan baik melalui model bingham [7]. Dewasa ini kita telah membandingkan perilaku tekanan, *elongation* dan *shearing*, dari fluida ER, dan telah mempelajari kompresi bertahap dari fluida ER pada voltase konstan yang berbeda-beda.

2.1.1 Jenis Fluida Electro-rheological

Terdapat 2 jenis utama dari fluida *electro-rheological*, yaitu:

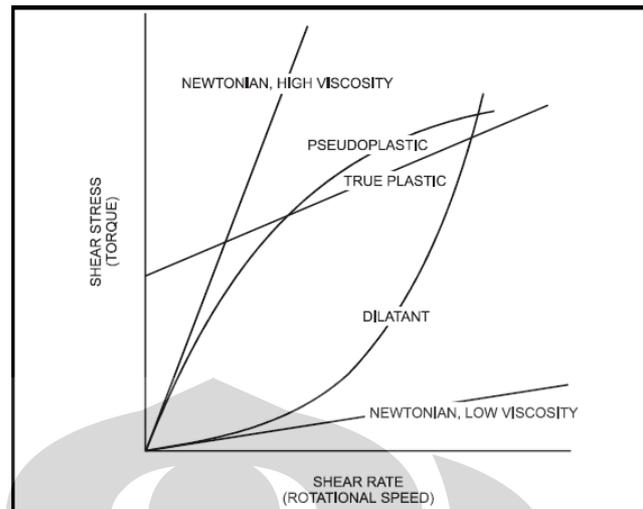
1. Homogen.

Untuk jenis homogen, fluida *electro-rheological* jenis ini merupakan suatu fluida tanpa partikel terdispersi di dalamnya dimana akan merespon secara mekanis bila diberikan medan listrik. Fluida jenis ini juga memiliki potensi besar dalam penggunaannya pada alat-alat mekanis yang sangat kecil, atau dikenal dengan mesin mikro.

2. Berpartikel.

Pada dasarnya terdispersi partikel semi-conductor berukuran mikro yang terisolasi dalam cairan pembawa. Fluida *electro-rheological* jenis ini bila diberikan medan listrik akan mengakibatkan partikel-partikel di dalamnya mempolarisasikan medan listrik dan hasil dari interaksi tersebut akan mengakibatkan peningkatan kadar *viscous* suatu fluida [8-9].

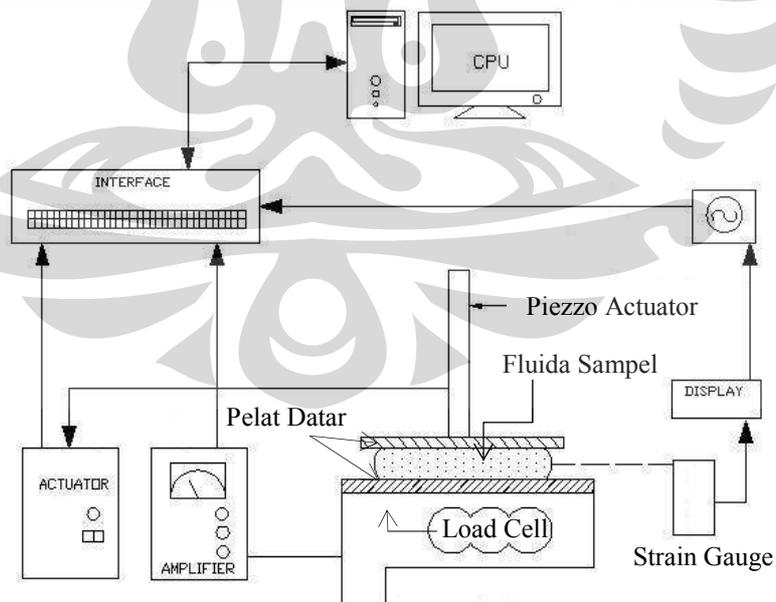
Sebagai tambahan, jenis fluida *electro-rheological* berpartikel menunjukkan efek ER yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan jenis lainnya, tetapi terdapat kesulitan dalam mengaplikasikan jenis fluida ke dalam alat-alat mikro dikarenakan tingginya kekentalan fluida tersebut [10]. Grafik standar shear stress-strain rate berbagai macam fluida dapat pada grafik berikut



Gambar 2.1 Karakterisasi Fluida

2.2 Piezoelectricity

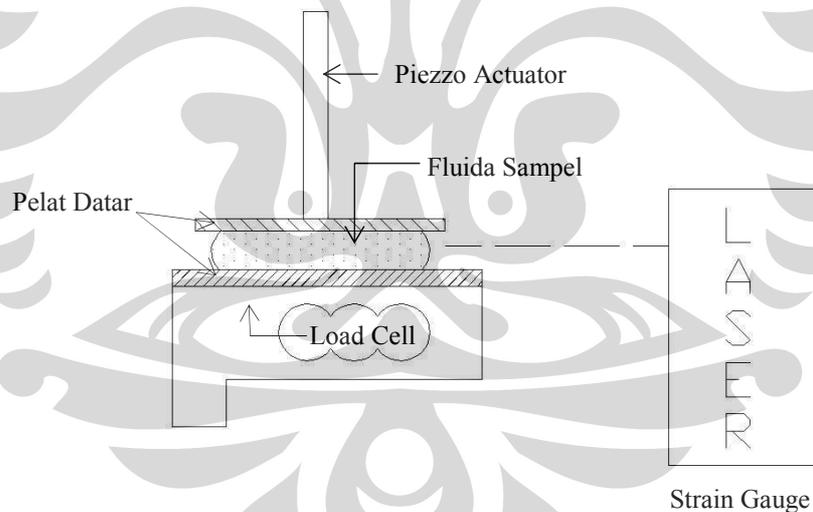
Merupakan suatu kemampuan pada beberapa material, seperti kristal, keramik, dan beberapa protein, untuk menghasilkan medan listrik yang kemudian direspon untuk menjadi mekanikal stress [11]. Piezzo-aktuator dengan pengontrol getaran menggunakan amplifier digunakan oleh penulis untuk menghasilkan *squeeze flow* pada fluida sample (gambar 2.1).



Gambar 2.2 Ilustrasi Instalasi Piezzo-Actuator

2.3 Squeeze Flow

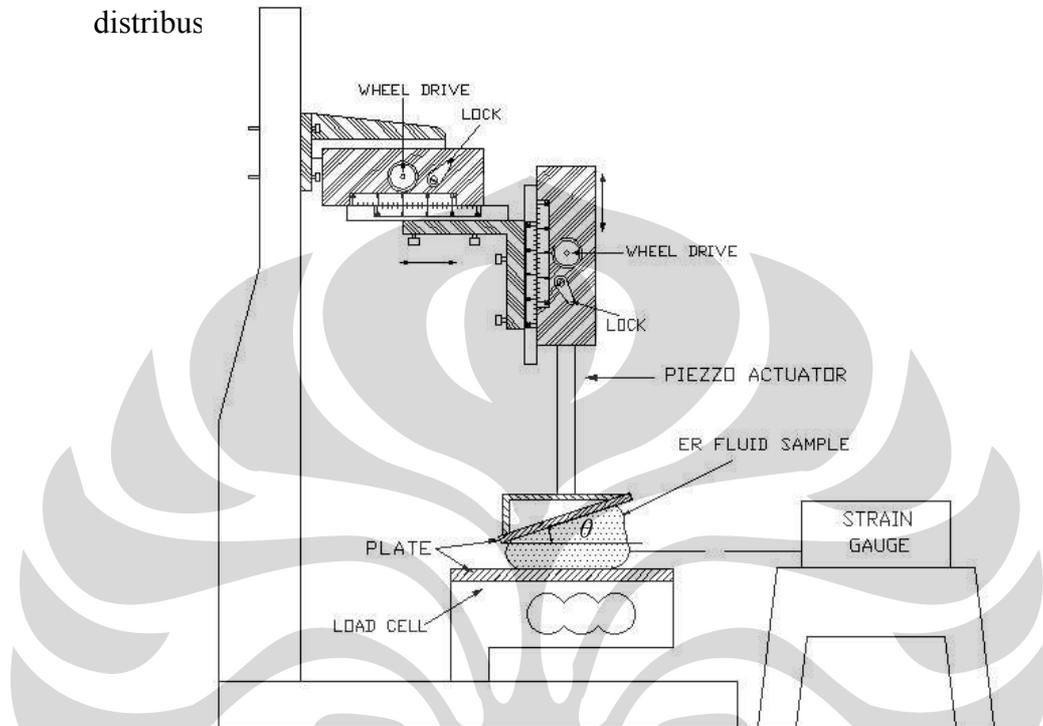
Ketika sebuah fluida diletakkan diantara dua buah plat paralel dan mulai digetarkan, maka akan timbul *Biaxial extensional flow* pada fluida sample tersebut. Inilah yang dinamakan sebagai *squeeze flow* [12]. “*squeeze flow*” yaitu, aliran yang terjadi pada fluida saat fluida tersebut ditekan atau digetarkan diantara 2 buah plat paralel (gambar 2.2) [13]. Ketika gaya yang diberikan dari salah satu pelat dapat dihitung bersama dengan jarak yang terdapat diantara kedua pelat tersebut, maka dapat menghasilkan nilai *biaxial Strain rate*. *Squeeze flow* sering ditemukan dalam dunia teknik, biologi dan *rheometer*. Beberapa fenomena yang terjadi di sekeliling kita seperti mengunyah makanan, tertekannya makanan antara lidah dan langit-langit mulut, dan juga menekan makanan diantara jari tangan dapat dikategorikan sebagai *squeeze flow* [14-17].



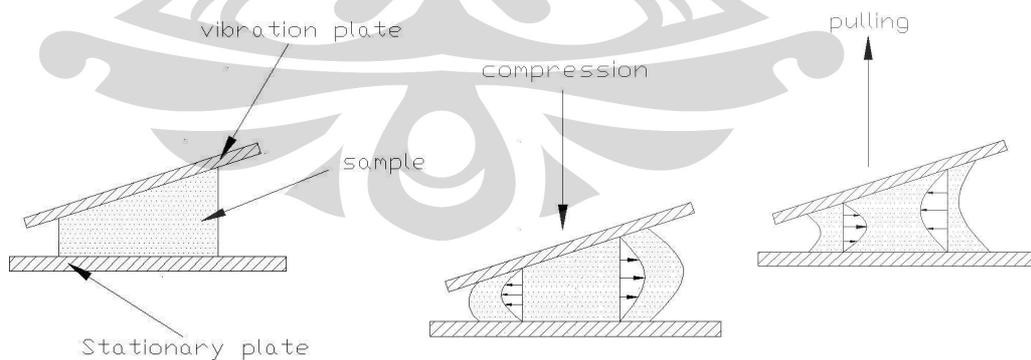
Gambar 2.3 Ilustrasi Penempatan Fluida Sample

Squeeze flow merupakan sebuah teknik yang menarik untuk mengukur *rheological properties* dari sebuah material yang memiliki kesukaran dalam pengukurannya menggunakan rheometer konvensional, sebagai contoh: material yang terlalu pekat, serta material yang mengandung partikel-partikel besar [18].

Dalam penelitian untuk Tugas Akhir kali ini, penulis mencoba suatu inovasi pada fluida sample yaitu menerapkan sudut θ pada plat datar yang terhubung dengan *piezzo-actuator* (Gambar 2.3). Pengaplikasian sudut θ pada fluida sampel memiliki karakteristik distribusi aliran yang berbeda dengan distribus



Gambar 2.3 Aplikasi Sudut pada fluida sampel



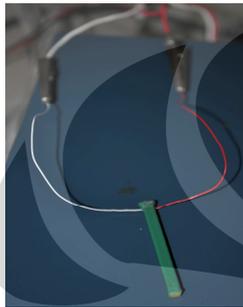
Gambar 2.4 Perbandingan Distribusi Kecepatan Fluida Dalam Pipa Dengan Diantara 2 Pelat Paralel

BAB III

RANCANGAN ALAT

3.1 Spesifikasi Komponen

- a. Piezoactuator, berfungsi untuk merubah energi listrik menjadi energi mekanis, sebagai media yang memberikan gaya pada fluida yang akan diuji.



Gambar 3.1

- b. Load cell, berfungsi sebagai sensor pengukur stress yang diterima oleh fluida sample



Gambar 3.2

- c. Lasser Omron ZX-series, berfungsi sebagai sensor pengukur regangan fluida sample



Gambar 3.3

d. Pelat, berfungsi sebagai tempat diletakkan fluida yang akan diuji

e. Amplifier, berfungsi untuk menyalurkan hasil data yang diperoleh dari load cell untuk diteruskan ke interface untuk kemudian diterjemahkan oleh CPU.



Gambar 3.5

f. Actuator, berfungsi untuk menyalurkan perintah dari CPU untuk menggetarkan piezoactuator.



Gambar 3.6

g. Interface, berfungsi untuk menterjemahkan hasil data yang didapat ke dalam computer.

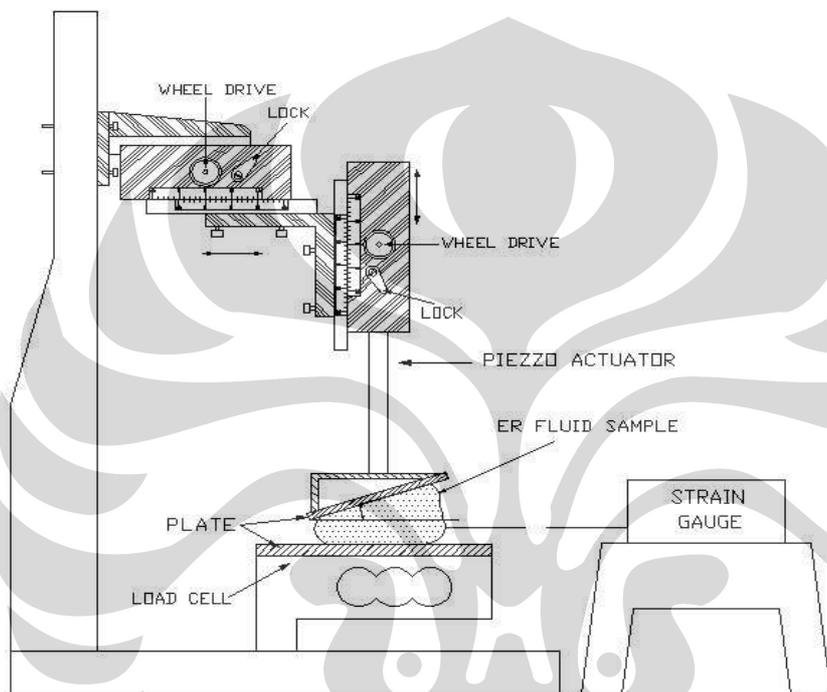


Gambar 3.7

- h. CPU, berfungsi untuk mengatur pengambilan data dan mengolah data yang telah diperoleh

3.2 Detail Rancangan alat

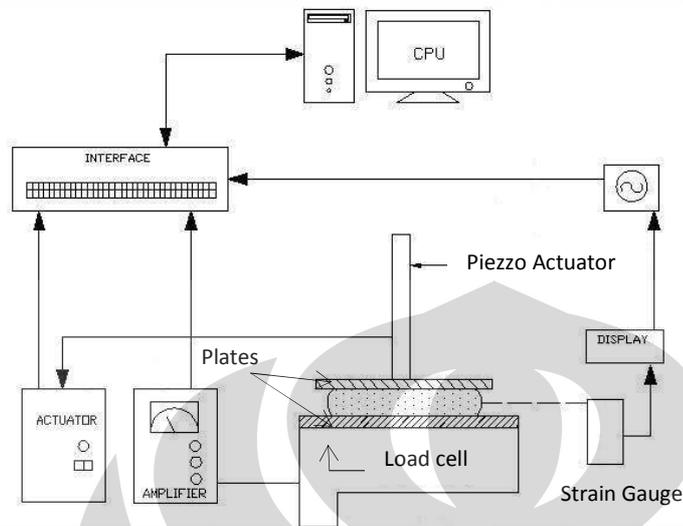
1. Rancangan pemasangan piezoactuator



Gambar 3.9

Pada rancangan ini pengukuran sangat diperhatikan pada posisi antar kedua pelat dan laser untuk melihat regangan pada fluida. Posisi pelat bagian atas dengan fluida harus diperhatikan jarak diantaranya karena dapat berpengaruh pada stress yang diterima oleh fluida sampel.

2. Rancangan alat-alat pengoperasian pengambilan data



Gambar 3.10

3.3 Langkah Piezoactuator setting

Pada penelitian tugas akhir ini, ada 3 proses utama dalam instalasi piezoactuator, yaitu :

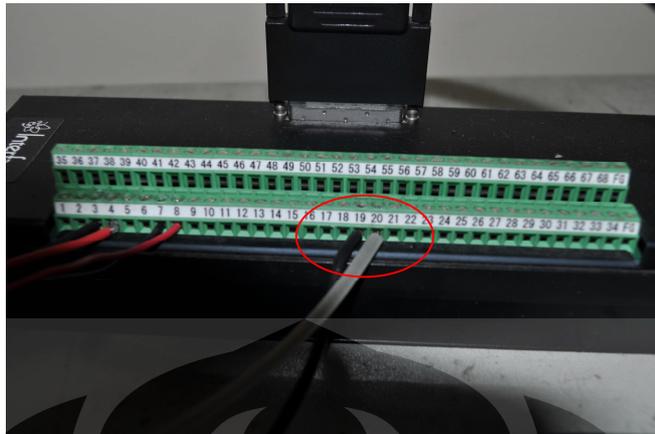
a. Setting Koneksi

1. Masukkan PC AD/DA ke PC Slot. (gambar 1)
2. Cek koneksi kabel pada interface
 - I. Kabel yang menghubungkan piezo dengan interface : kabel putih dihubungkan pada interface no. 20 dan kabel hitam dihubungkan pada interface no. 19.

Keterangan :

- No. 19 Vcom1: ini merupakan voltage common channel I, common voltage dapat pula dikatakan sebagai ground voltage.
- No. 20 Vout1 : ini merupakan voltage out channel 1,

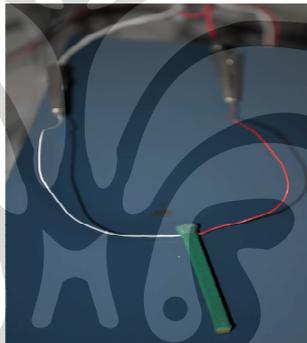
Kedua kabel tersebut dihubungkan pada input pada drive actuator seperti terlihat pada gambar dibawah ini :



Gambar 3.11

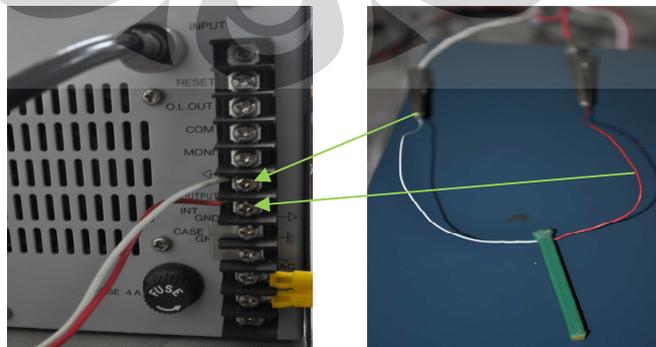
II. Kabel yang menghubungkan antara piezzo dengan drive actuator

- Piezzoatuator dihubungkan oleh kabel putih dan merah seperti terlihat pada gambar dibawah :



Gambar 3.12

- Sedangkan kabel merah dihubungkan dengan output dan putih dihubungkan dengan ground pada drive actuator seperti terlihat pada gambar dibawah :

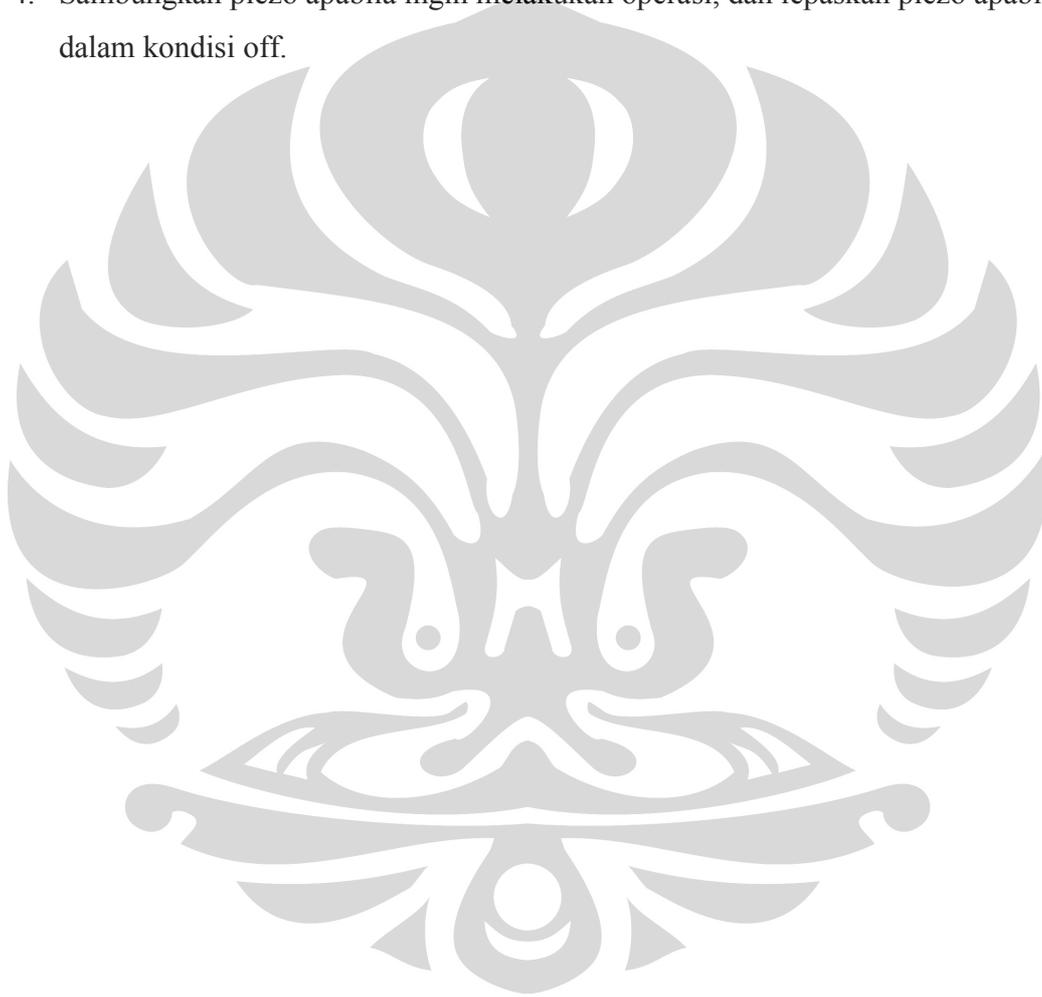


Gambar 3.13

b. Pengoperasian program

Setelah semua kabel telah dikoneksikan dengan benar, tahap selanjutnya adalah proses pengoperasian adapun tahapannya adalah :

1. Buka aplikasi interface GPC-3300 (Digital to analog)
2. Open file
3. Setting
4. Sambungkan piezo apabila ingin melakukan operasi, dan lepaskan piezo apabila dalam kondisi off.



BAB IV

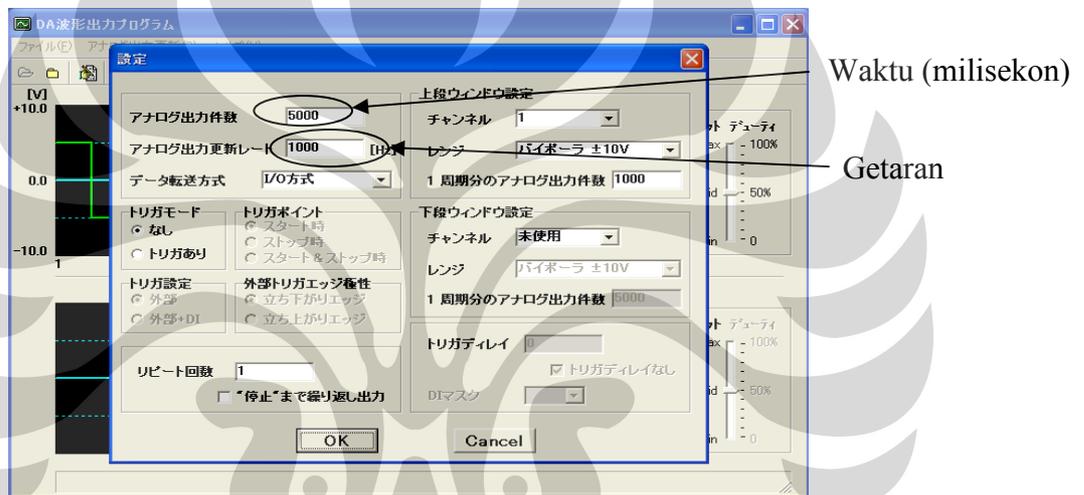
METODE PENGAMBILAN DATA DAN ANALISA

4.1 Proses Pengambilan Data

Pada proses pengambilan data, terdapat 4 kali pengambilan data pada tiap sampel dengan peningkatan gaya yang diberikan pada fluida tersebut.

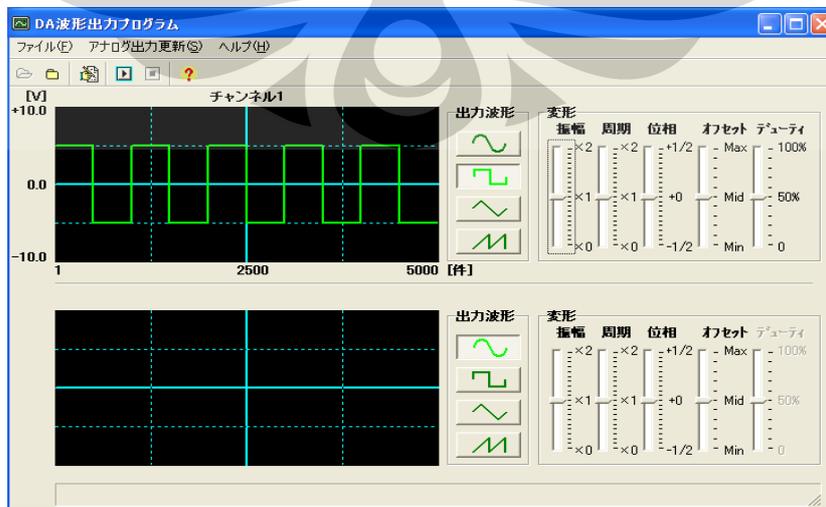
1. Dengan diberi tegangan 1000 Hz

Dilakukan pengambilan dengan cara mengatur pemberian gaya pada aplikasi GPC-3300 Digital to Analog (DA) seperti gambar dibawah ini



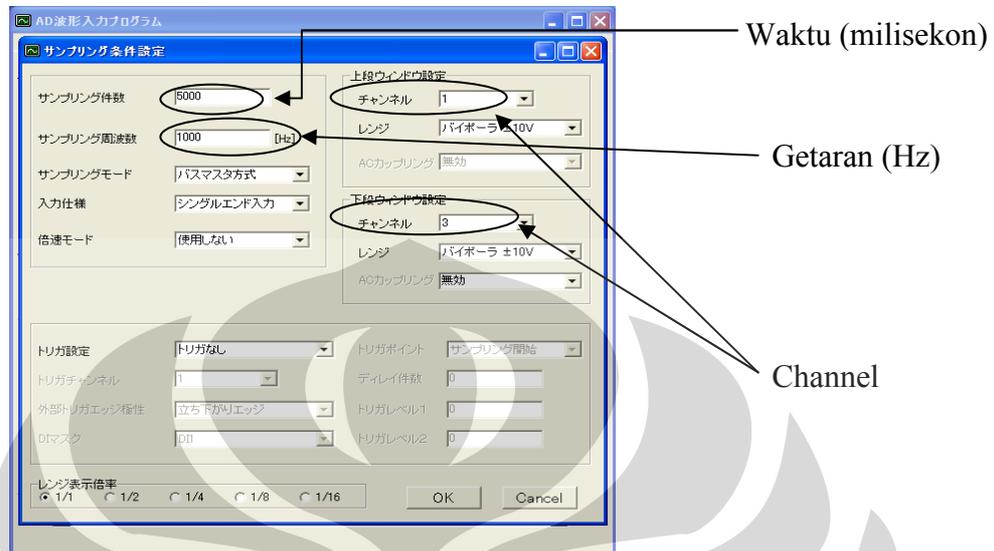
Gambar 4.1

Sehingga akan muncul grafik yang menggambarkan bentuk getaran yang akan diberikan pada fluida sampel uji seperti gambar dibawah ini



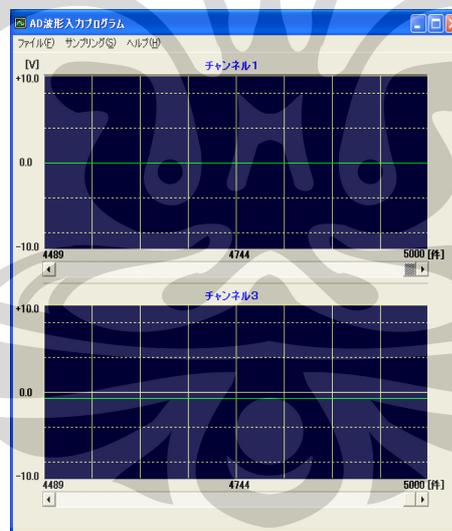
Gambar 4.2

Pada aplikasi Analog to Digital (AD) juga diatur untuk melihat data yang akan diterima dari load cell dan strain gauge sehingga pada AD juga harus di atur terlebih dahulu seperti gambar di bawah ini



Gambar 4.3

Setelah di atur seperti diatas maka, akan di dapat grafik pada AD seperti gambar dibawah ini

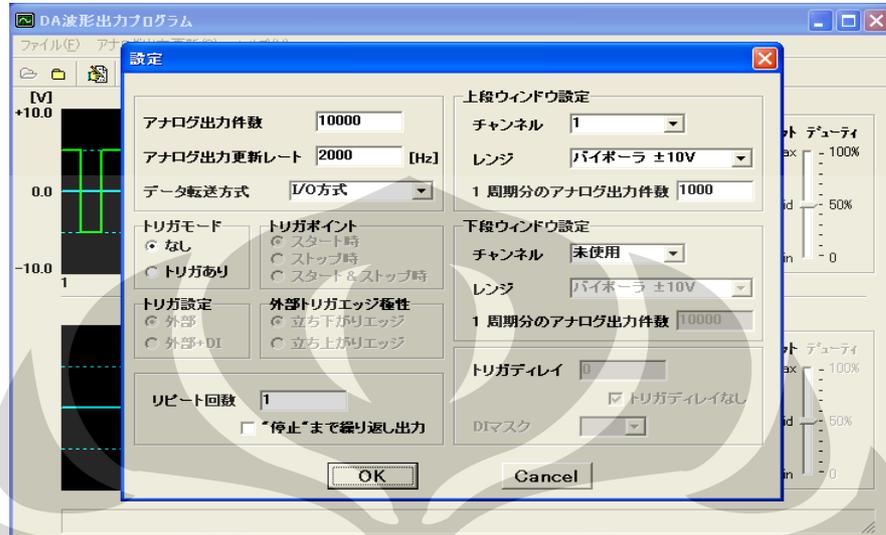


Gambar 4.4

Setelah grafik didapat seperti gambar diatas, maka hasilnya dapat diterjemahkan ke dalam bentuk Microsoft Excel.

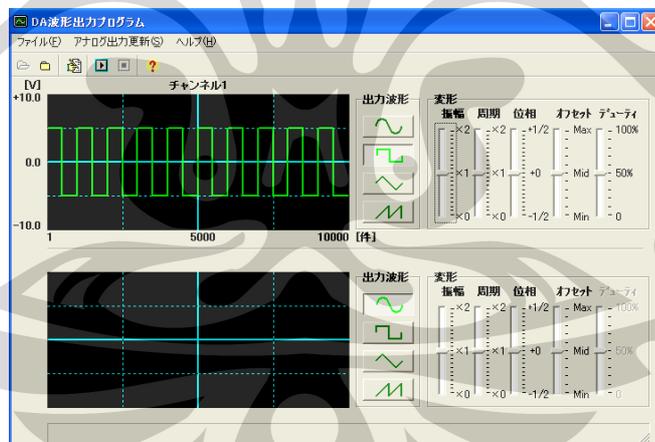
2. Diberi tegangan 2000 Hz

Setelah data pada 1000 Hz didapat maka dilanjutkan dengan tegangan 2000 Hz dengan merubah pengaturan pada gambar dibawah ini



Gambar 4.5

Sehingga pada DA akan membentuk grafik seperti gambar di bawah ini

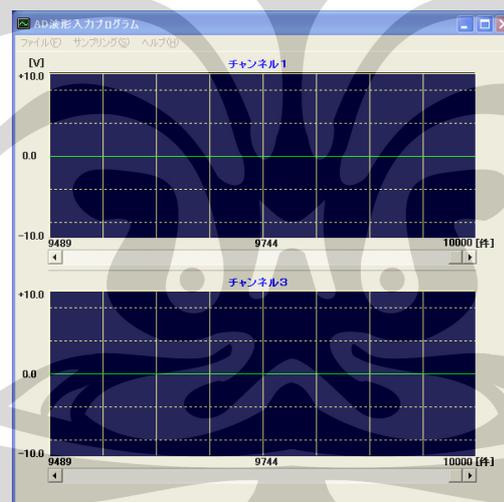


Gambar 4.6

Pada AD juga dilakukan pengaturan seperti gambar dibawah ini :



Setelah pengaturan sesuai dengan gambar-gambar diatas maka proses pengambilan data dapat dilakukan. Sehingga pada aplikasi AD akan menghasilkan grafik seperti dibawah ini :



Gambar 4.8

Setelah mendapatkan hasil gradik yang ditandai dengan garis hijau, maka grafik tersebut dapat diterjemahkan ke aplikasi Microsoft excel.

3. Diberi tegangan 3000 Hz

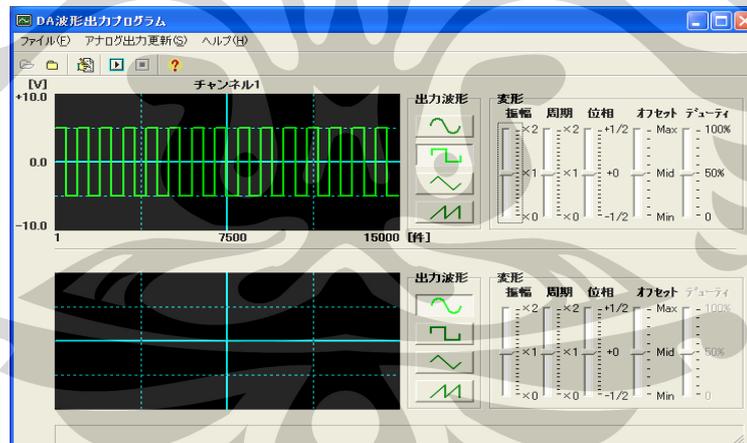
Seperti cara diatas pengaturan pada aplikasi DA seperti gambar di bawah

ini :



Gambar 4.9

Sehingga menghasilkan grafik pada aplikasi seperti gambar dibawah ini



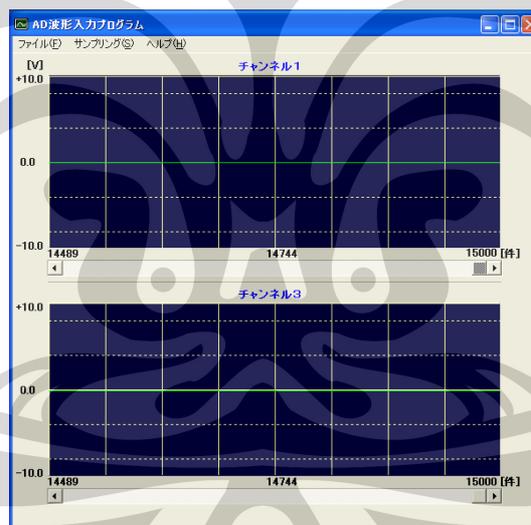
Gambar 4.10

Demikian juga pada aplikasi AD akan diatur seperti gambar dibawah ini



Gambar 4.11

Seperti yang dilakukan sebelumnya maka pada AD akan membentuk grafik seperti gambar dibawah ini



Gambar 4.12

Setelah didapat grafik diatas maka grafik tersebut dapat diterjemahkan ke aplikasi Microsoft Excel.

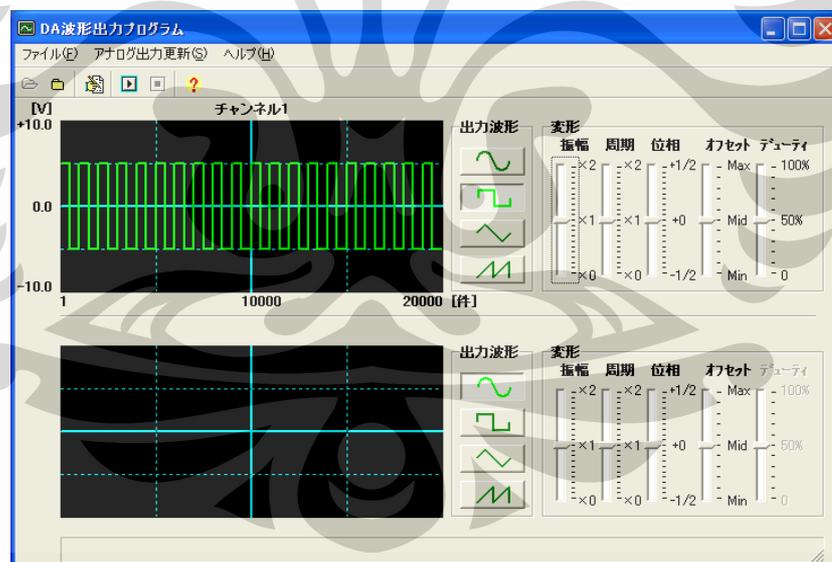
4. Diberi tegangan 4000 Hz

Seperti proses pengaturan diatas maka pada aplikasi DA diatur seperti gambar dibawah ini



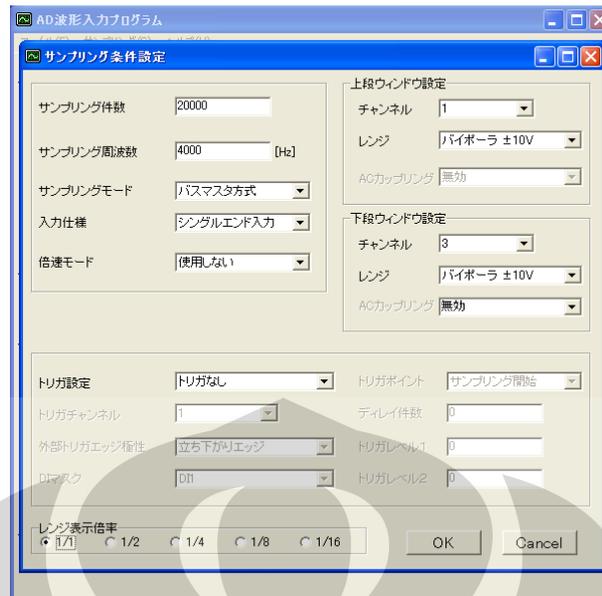
Gambar 4.13

Sehingga grafik pada DA akan seperti gambar dibawah ini



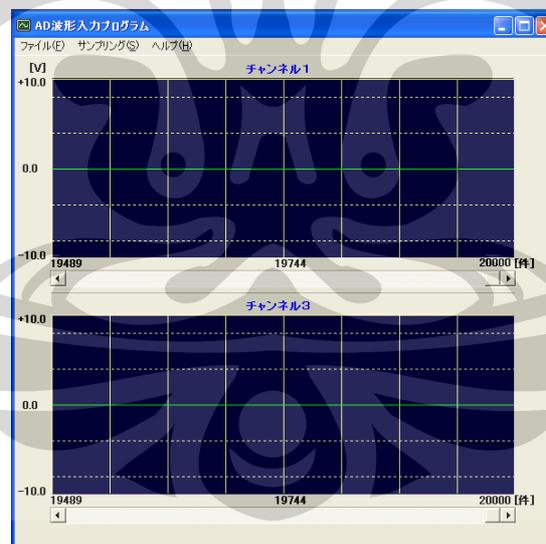
Gambar 4.14

Dan pengaturan pada aplikasi AD seperti gambar di bawah ini



Gambar 4.15

Setelah pengaturan sesuai dengan gambar diatas, maka pengambilan data dapat dilakukan pada sampel uji sehingga AD akan menghasilkan grafik seperti gambar dibawah ini yang dapat dibaca datanya dengan menggunakan Microsoft excel



Gambar 4.16

Proses pengambilan data tersebut kemudian diterapkan pada pelat datar dan pelat dengan memiliki kemiringan yang telah ditentukan (5^0 , 10^0 , 15^0 , 20^0).

4.2 Pengolahan Data

Setelah data di dapat dari hasil percobaan, maka akan didapat data seperti gambar dibawah ini. Contoh data sampel pada nilai gap 2 mm dan tegangan 1000 Hz.

Time[sec]	CH01	CH03
0.001	0.0885	0.40192
0.002	0.09064	0.40161
0.003	0.09155	0.40192
0.004	0.09186	0.40405
0.005	0.09216	0.40192
0.006	0.09186	0.40131
0.007	0.09308	0.40131
0.008	0.09308	0.39856
0.009	0.09003	0.40222
0.01	0.09308	0.40283
0.011	0.09338	0.40161
0.012	0.09399	0.40192
0.013	0.09216	0.40314
0.014	0.0943	0.40283
0.015	0.09369	0.40253
0.016	0.09277	0.40314
0.017	0.09308	0.40161
0.018	0.09247	0.40344
0.019	0.09186	0.40253
0.02	0.09216	0.40222
0.021	0.09125	0.40497
0.022	0.09125	0.40466
0.023	0.09247	0.40344
0.024	0.09125	0.40314
0.025	0.09064	0.40283
0.026	0.09094	0.40283
0.027	0.09125	0.39948
0.028	0.08972	0.40314
0.029	0.09003	0.40222
0.03	0.09064	0.40253
0.031	0.09094	0.40253
0.032	0.09125	0.40344
0.033	0.09186	0.40314
0.034	0.09064	0.40375
0.035	0.09094	0.40375
0.036	0.09064	0.39978
0.037	0.08698	0.40344
0.038	0.09125	0.40192
0.039	0.08942	0.40283
0.04	0.08972	0.40161
0.041	0.08942	0.39856
0.042	0.0885	0.40222
0.043	0.0885	0.40283
0.044	0.08789	0.4007
0.045	0.08698	0.4007
0.046	0.0882	0.40222
0.047	0.08728	0.401
0.048	0.08575	0.40161
0.049	0.08606	0.401
0.05	0.08575	0.39917
0.051	0.08636	0.40161
4.976	0.09064	0.44891
4.977	0.09064	0.44891
4.978	0.0882	0.44922
4.979	0.09216	0.44922
4.98	0.09216	0.44952
4.981	0.09186	0.44484
4.982	0.09308	0.44983
4.983	0.09399	0.44983
4.984	0.09338	0.45013
4.985	0.0943	0.44952
4.986	0.09155	0.44891
4.987	0.09338	0.44983
4.988	0.09308	0.45013
4.989	0.09399	0.45074
4.99	0.09277	0.45013
4.991	0.09216	0.45044
4.992	0.09338	0.45166
4.993	0.09277	0.45074
4.994	0.09308	0.45166
4.995	0.09247	0.44922
4.996	0.09155	0.45105
4.997	0.09125	0.44891
4.998	0.09094	0.45013
4.999	0.09186	0.45044
5.001	0.09064	0.45136

Gambar 4.17 Contoh data mentah yang diperoleh dalam penelitian

Sehingga setelah didapat data seperti gambar diatas maka CH03 pada table (C2 sampai dengan C5001) di kalibrasikan untuk mendapatkan perubahan jarak yang sesungguhnya yang didapat dari Strain Gauge. Nilai CH03 tersebut dibagi dengan 2,04 sehingga perubahan jarak sesungguhnya didapat ($H_{(t)}$).

Setelah pengolahan tersebut dilakukan, maka dicari inisial jarak untuk mencari H_0 dengan menghitung :

$$H_0 = (D_{\text{akhir}} - D_{\text{awal}}) + D_{\text{mula-mula}}$$

Dimana D_{awal} adalah jarak awal sesaat sebelum fluida mulai digetarkan dan D_{akhir} adalah jarak akhir setelah fluida digetarkan. Setelah itu, semua nilai rata-rata dari $H_{(t)}$ yang didapat dibagi dengan nilai H_0 yang diperoleh, sehingga nilai yang didapat digunakan untuk mencari nilai e dimana nilai e diperoleh dari persamaan Henky-Strain :

$$e = -\ln \frac{H(t)}{H_0}$$

Setelah nilai e diperoleh, maka kita beralih ke pada CH01 (kolom B2 sampai dengan B5001). Data pada CH01 atau channel 1 pada interface didapat dari detector pendeteksi gaya, dimana gaya maksimum dapat sebesar 0,5884 N/kV.

Data pada kolom B kemudian dicari rata-ratanya untuk mendapatkan nilai rata-rata gaya yang diperoleh sebesar 0,089897 . setelah itu nilai rata-rata yang didapat maka nilai tersebut dikalikan dengan 0,5884 N/kv untuk mendapatkan nilai F . setelah nilai F didapat, kemudian dikonversi ke dalam format true-stress Hengky strain sesuai dengan persamaan berikut :

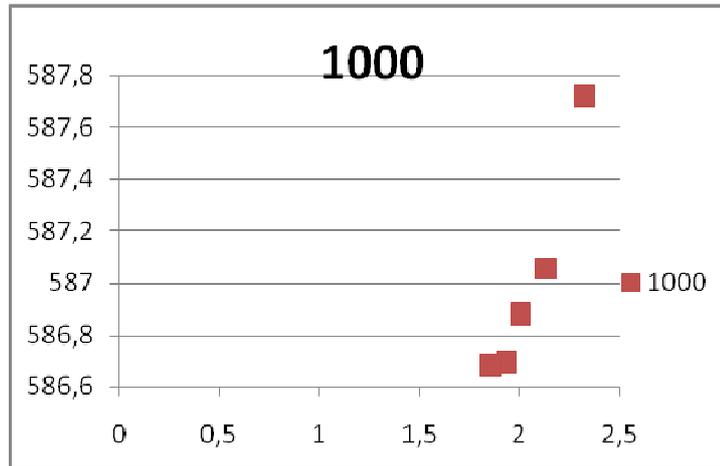
$$\tau = \frac{F(t)}{A}$$

Dimana:

$F(t)$ adalah gaya saat waktu t

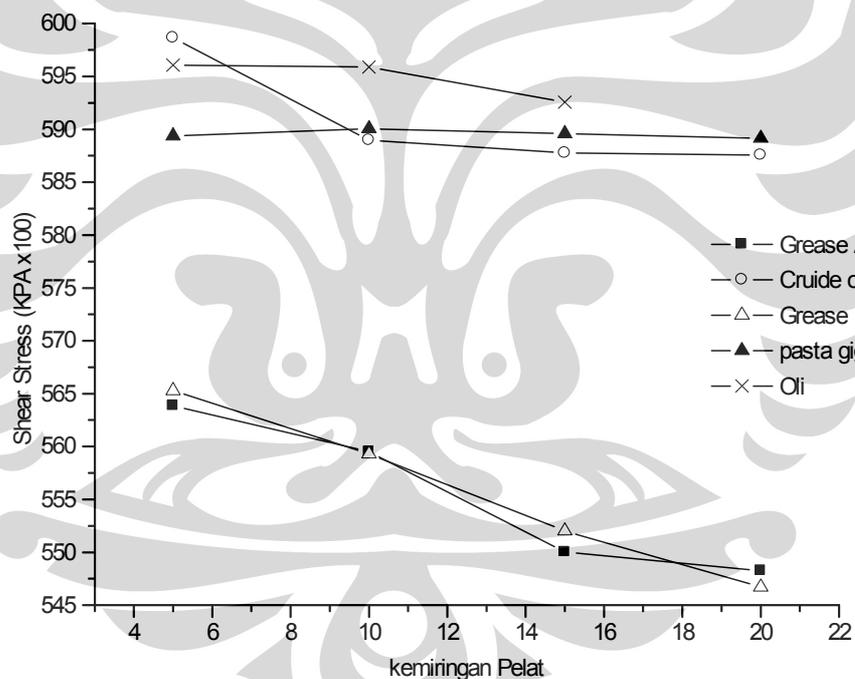
A adalah luas area sampel uji

Dalam setiap pengambilan data, sampel uji diberikan 4 tegangan yaitu 1000 Hz, 2000 Hz, 3000 Hz, 4000 Hz. Setiap tegangan yang diberikan, diambil 5 data sehingga untuk keempat data yang lain diperlakukan sama dengan data pertama, tetapi nilai pada kolom C atau nilai dari strain gauge yang telah diolah menjadi nilai H harus dikalibrasi dengan nilai H_{awal} pada perhitungan data pertama yang telah diolah tadi sehingga H_{awal} untuk semua data sama. Hal ini dilakukan supaya grafik yang didapat lebih terlihat perubahannya, sehingga grafik pada tegangan 1000 Hz akan memperlihatkan seperti gambar dibawah ini.



Gambar 4.18 Contoh grafik 1000 Hz setelah diolah

Untuk perhitungan data pada 2000 Hz, 3000 Hz dan 4000 Hz diperlakukan sama dengan perhitungan pada tegangan 1000 Hz sehingga data dari sampel tersebut akan membentuk grafik seperti dibawah ini.



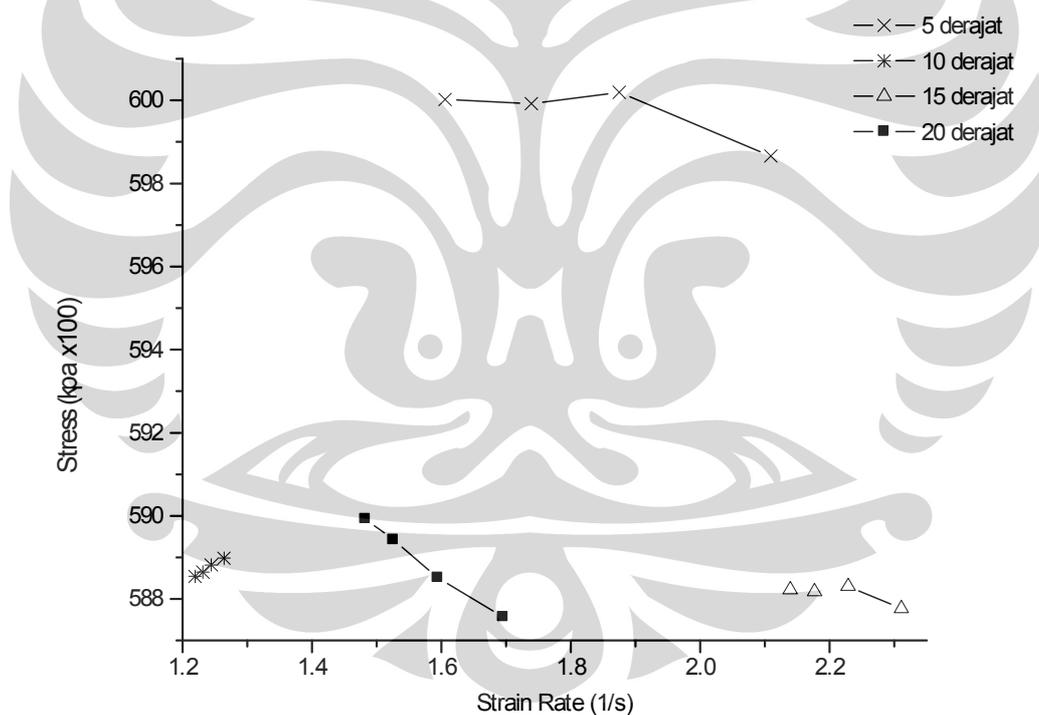
Gambar 4.19 Contoh Penggabungan Grafik sebuah fluida sampel pada tegangan 1000 Hz

Demikianlah contoh proses pengolahan data yang dilakukan pada data hasil penelitian yang dilakukan. Demikian juga perhitungan tersebut dilakukan untuk percobaan dengan kedua pelat paralel yang membentuk sudut sebesar 5° , 10° , 15° , 20° .

4.3 Analisa Data Sampel

Pada gambar 4.19 menunjukkan grafik hubungan antara shear stress dengan kemiringan sudut yang diberikan frekuensi getaran 1000 Hz. Dari grafik tersebut dapat terlihat bahwa semakin besar sudut kemiringan antar pelat yang diberikan pada fluida tersebut maka nilai stress pada fluida tersebut akan semakin kecil. Hal ini menunjukkan semakin tinggi gap yang diberikan pada fluida maka semakin kecil nilai stress yang dimiliki oleh fluida tersebut. Bentuk grafik dari setiap sampel pun berbeda-beda tergantung pada kekentalan fluida yang akan diuji.

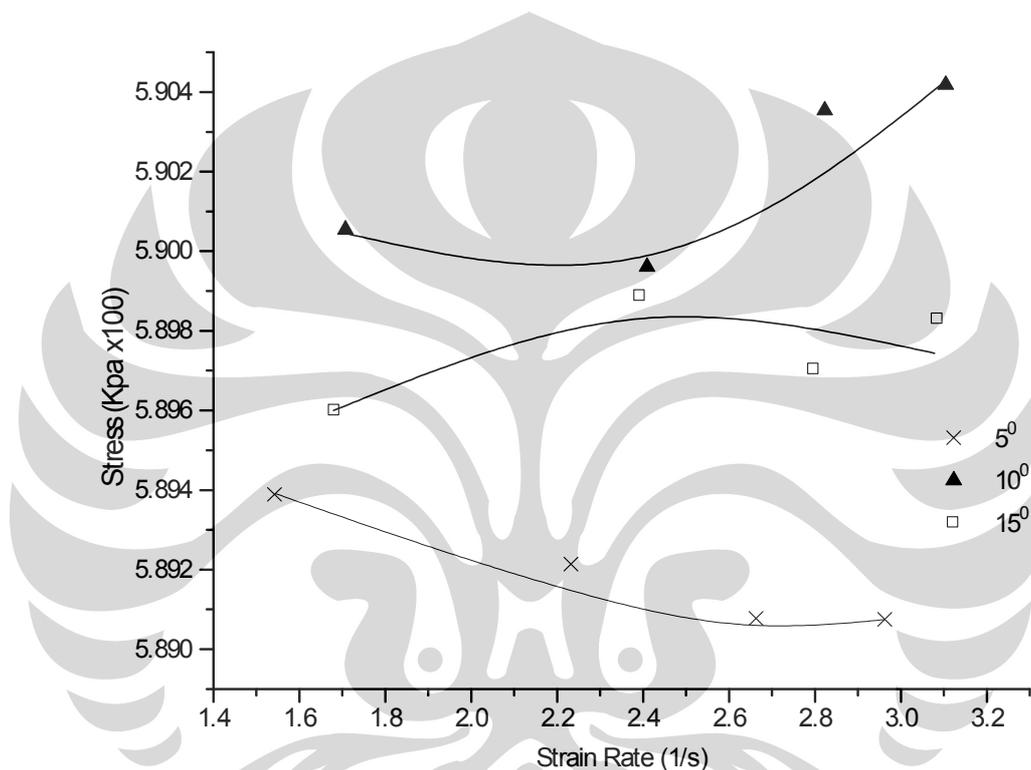
Bila dilihat dari grafik hubungan antara Shear stress dan shear strain maka akan seperti gambar berikut ini.



Gambar 4.20 Grafik Stress – Strain rate Gabungan Crude Oil pada pelat yang memiliki kemiringan sudut

Pada gambar 4.20. Menunjukkan hubungan antara shear stress dengan strain rate untuk contoh material crude oil dengan menggunakan sudut yang memiliki kemiringan 5° , 10° , 15° , 20° . Pada gambar diatas juga menunjukkan hasil percobaan dengan variasi getaran mulai dari 1000 Hz, 2000 Hz, 3000 Hz dan

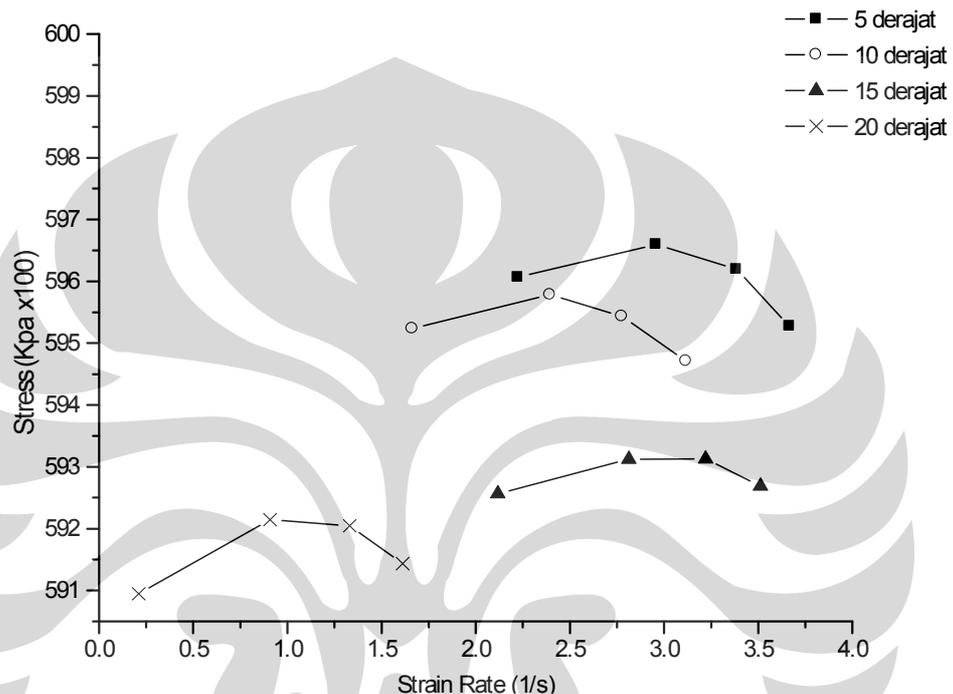
4000 Hz. Terlihat bahwa pada percobaan menunjukkan setiap kenaikan frekuensi getaran yang diberikan, maka nilai shear stress pada sampel tersebut juga akan naik namun strain rate dari fluida tersebut akan semakin turun seiring dengan bertambahnya frekuensi getaran yang diberikan. Namun berbeda pada kemiringan 10^0 , terlihat bahwa nilai shear stress pada fluida tersebut akan semakin kecil seiring dengan semakin besarnya frekuensi getaran yang diberikan.



Gambar 4.21 Grafik Stress – Strain rate Gabungan Oli pada pelat yang memiliki kemiringan sudut

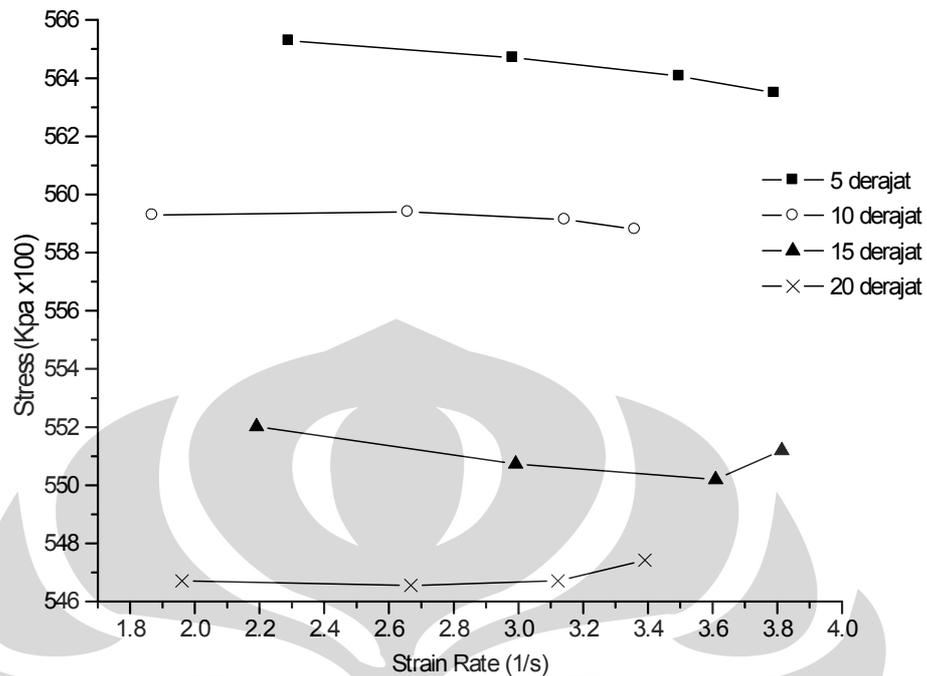
Pada gambar 4.21. menunjukkan hubungan shear stress dengan strain rate untuk contoh fluida oli dengan menggunakan sudut kemiringan yang telah ditentukan. Namun pada percobaan ini hanya menggunakan sudut kemiringan 5^0 , 10^0 , 15^0 dan tidak menggunakan sudut 20^0 karena pada pelat dengan kemiringan tersebut, fluida terlalu cair sehingga fluida tersebut kurang mendukung untuk pengujian pada kemiringan 20^0 . Pada grafik diatas juga diberikan variasi getaran mulai dari 1000 Hz, 2000 Hz, 3000 Hz dan 4000 Hz. Dapat dilihat bahwa kenaikan frekuensi getaran yang diberikan pada fluida maka akan diikuti oleh kenaikan nilai strain rate pada fluida tersebut. Pada nilai shear stress fluida

tersebut, dimana setiap kenaikan frekuensi maka fluida tersebut akan mengalami penurunan nilai shear stress pada kemiringan 5 derajat, namun pada kemiringan 10^0 dan 15^0 terlihat nilai stress pada fluida tersebut akan semakin naik seiring dengan bertambahnya frekuensi getaran yang diberikan seperti terlihat pada trend line yang ditunjukkan oleh gambar 4.21.



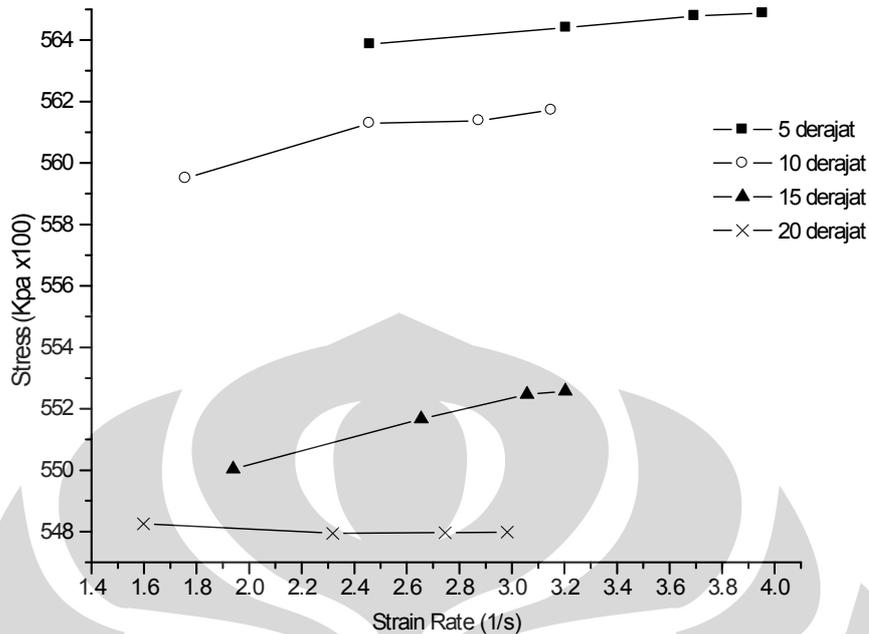
Gambar 4.22 Grafik Stress – Strain rate Gabungan Pasta Gigi pada pelat yang memiliki kemiringan sudut

Pada gambar 4.22. Menunjukkan grafik hubungan shear stress dengan strain rate pada contoh fluida pasta gigi dengan pemberian frekuensi getaran mulai dari 1000 Hz, 2000 Hz, 3000 Hz, 4000 Hz. Pada grafik ini menunjukkan kenaikan frekuensi getaran yang diberikan ke fluida tersebut akan diikuti oleh kenaikan shear stress pada fluida tersebut, namun pada frekuensi 2000 Hz terlihat bahwa fluida tersebut mencapai titik puncak kenaikan nilai shear stress sehingga ketika diberi getaran dengan frekuensi 3000 Hz, nilai shear stress pada fluida tersebut akan mulai kembali turun. Pada strain rate fluida tersebut juga dapat dilihat bahwa semakin tinggi frekuensi getaran yang diberikan pada fluida tersebut maka nilai strain rate yang dihasilkan akan semakin besar pula.



Gambar 4.23 Grafik Stress – Strain rate Gabungan Grease A pada pelat yang memiliki kemiringan sudut

Pada grafik 4.23 menunjukkan hubungan antara shear stress dengan strain rate pada contoh fluida Grease A dimana memiliki kemiringan 5° , 10° , 15° , 20° pada pelat uji. Grafik diatas juga menunjukkan hasil pengolahan dengan menggunakan variasi frekuensi getaran mulai dari 1000 Hz, 2000 Hz, 3000 Hz, 4000 Hz. Dari grafik diatas dapat menunjukkan bahwa pada pelat dengan kemiringan 5° dan 10° menunjukkan bahwa setiap kenaikan frekuensi getaran yang diberikan akan diikuti oleh penurunan nilai shear stress pada fluida tersebut dan diikuti kenaikan nilai strain rate. Namun pada kemiringan pelat 15° dan 20° nilai shear stress pada fluida tersebut cenderung terlihat turun, tetapi setelah frekuensi 3000 Hz akan terlihat kenaikan nilai shear stress pada kemiringan pelat 15° , dan pada kemiringan 20° nilai shear stress pada fluida tersebut akan terlihat naik setelah diberi frekuensi 2000 Hz



Gambar 4.24 Grafik Stress – Strain rate Gabungan Grease B pada pelat yang memiliki kemiringan sudut

Pada gambar 4.24 menunjukkan grafik hubungan shear stress dan strain rate pada contoh fluida Grease yang lebih padat dari grease yang sebelumnya. Pada fluida tersebut juga diberikan perlakuan yang sama dengan percobaan sebelumnya dengan menggunakan kemiringan sudut 5° , 10° , 15° , 20° . Pada setiap percobaan juga diberikan perbedaan frekuensi getaran pada fluida tersebut mulai dari 1000 Hz, 2000 Hz, 3000 Hz, 4000 Hz. Pada fluida ini terlihat semakin tinggi nilai frekuensi getaran yang diberikan pada fluida tersebut, maka nilai strain rate dan nilai shear stress pada fluida tersebut akan naik juga seperti terlihat pada gambar 4.24. Namun pada kemiringan sudut 20° menunjukkan perbedaan hasil grafik dimana setiap kenaikan grafik menunjukkan bahwa setiap kenaikan frekuensi akan diikuti oleh penurunan nilai shear stress pada fluida tersebut.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil percobaan diatas yang kami lakukan dengan menggunakan beberapa sampel uji dapat disimpulkan bahwa kekentalan pada fluida tidak hanya dipengaruhi oleh temperature, tetapi juga oleh kecepatan dan waktu (Fluida non-newtonian). Semakin besar sudut kemiringan pada pelat uji akan berpengaruh pada semakin besarnya nilai shear- stress pada fluida tersebut. Semakin besar frekuensi getaran yang diberikan maka semakin besar pula nilai strain rate pada fluida tersebut

Nilai shear stress yang lebih rendah berdampak pada turunnya energi yang diperlukan oleh fluida tersebut untuk dialirkan baik dalam pipa atau untuk pelumasan. Dengan turunnya energi yang digunakan, maka biaya juga dapat ditekan.

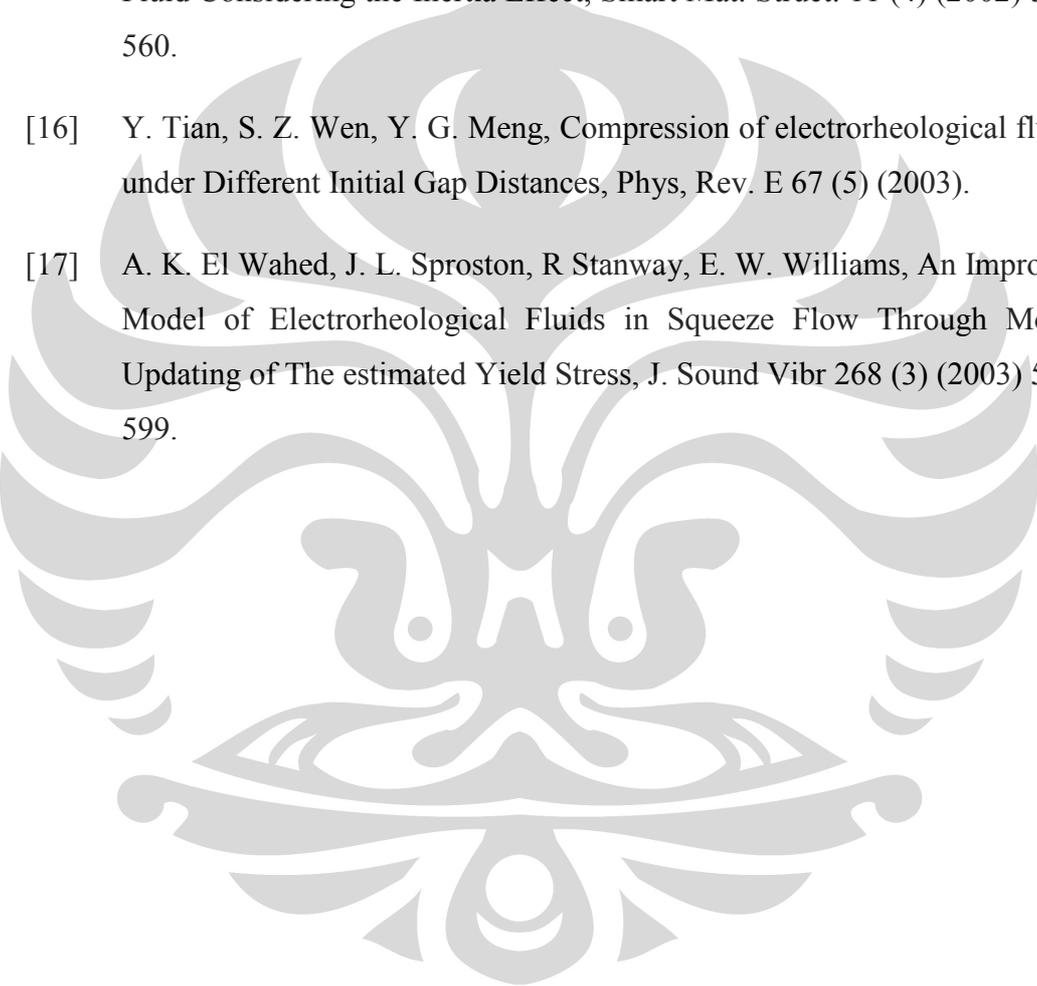
5.2 Saran

Alat *Piezzo-acctuator* yang kami gunakan dalam meneliti masih memerlukan banyak penyempurnaan dari berbagai aspek, diantaranya adalah:

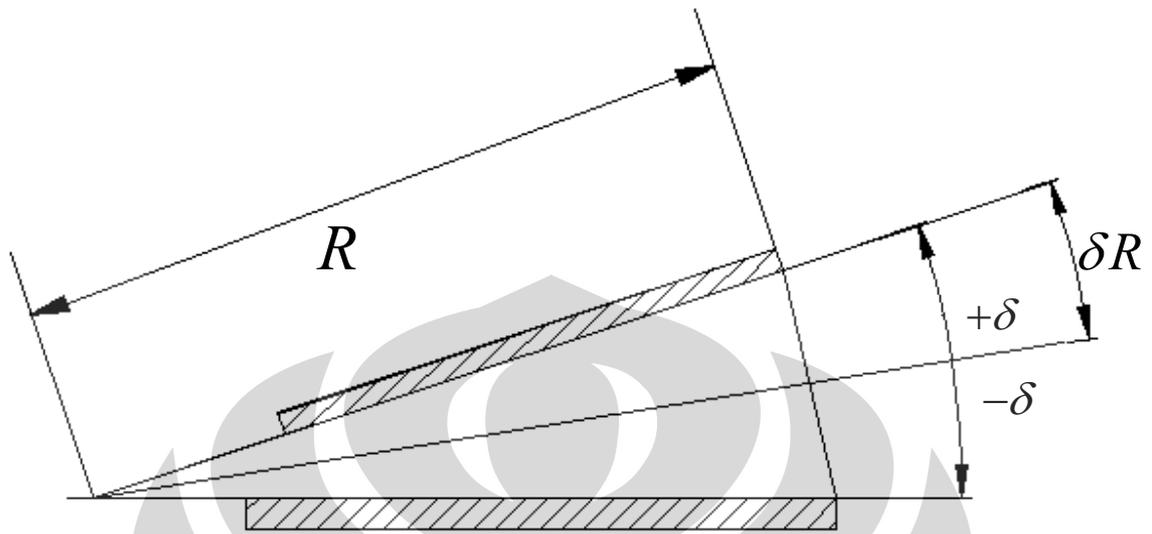
- Pemasangan *Piezzo-acctuator* yang lebih baik guna menghindari rusak atau patah atau tidak berfungsinya alat tersebut.
- Penempatan *strain gauge* (laser) yang lebih rigid guna menghindari kesulitan maupun kesukaran dalam mendapatkan data sampel.
- Dalam penelitian pelat miring, diusahakan agar membuat pelat dengan tanpa mereduksi getaran dari *Piezzo-acctuator* dan sudut kemiringannya dapat diatur sehingga proses penelitian menjadi lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. D. Weiss, J. P. Coulter, and J. D. Carlson, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 4, 248 (1993).
- [2] J. L. Sproston, R. Stanway, and A. Faghmous, *Rev. Gen. Electr.* 21, 21 (1991).
- [3] G. J. Monkman, *J. Phys. D* 28, 588 (1995).
- [4] S. L. Viera, M. Nakano, R. Oke, and T. Nagata, *Int. J. Mod. Phys. B* 15, 714 (2001).
- [5] S. H. Chu, S. J. Lee, and K. H. Ahn, *J. Rheol.* 44, 105 (2000).
- [6] V. Noresson and N. G. Ohlson, *Mater. Des.* 22, 651 (2001).
- [7] Parthasarthy, M. And Klingenberg, D. J., *Electrorheology Mechanisms and Modeling, Mat. Sci. Eng., Vol R 17* (1996), pp.57-103.
- [8] See, H., *Advances in Modelling the Mechanisms and Rheology of Electrorheological Fluids, Korea Australia Rheology Journal, Vol.11* (1999), pp.169-195.
- [9] Narumi, T., Maeda, H., Hasegawa, T. And Sakai, M., *Electrorheological Effect of Liquid Crystal in Narrow Gaps, Proc. JSME ICFE '97, Vol.1* (1997), pp.497-500.
- [10] Narumi, T., See, H., Yamaguchi, Y. And Hasegawa, T., *Electrorheological Response of Liquid Crystal Under Oscillatory Squeeze Flow, Proc. JSME 2004, Vol.48 No.3* (2005)
- [11] [www.wikipedia.com \(http://en.wikipedia.org/wiki/piezoelectricity\)](http://en.wikipedia.org/wiki/piezoelectricity)
- [12] Johansson Kristin and Standing Mats, *Methodology and measurements of Extensional Rheology by Contraction an Squeeze flow, Nordic Rheology Society, Vol.11* (2003)

- 
- [13] H. T See, J. S Field, B Pfister, The Response of Electrorheological Fluid Under Oscillatory Squeeze Flow. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 84 (1999) 149-158.
- [14] S. H. Chu, S. J. Lee, An Experimental Study on the Squeezing Flow of Electrorheological suspensions, *J. Rheol.* 44 (2000) 105-120.
- [15] C. Y. Lee, C. Y. Wen, The Oscillatory Squeeze Flow of electrorheological Fluid Considering the Inertia Effect, *Smart Mat. Struct.* 11 (4) (2002) 553-560.
- [16] Y. Tian, S. Z. Wen, Y. G. Meng, Compression of electrorheological fluids under Different Initial Gap Distances, *Phys, Rev. E* 67 (5) (2003).
- [17] A. K. El Wahed, J. L. Sproston, R Stanway, E. W. Williams, An Improved Model of Electrorheological Fluids in Squeeze Flow Through Model Updating of The estimated Yield Stress, *J. Sound Vibr* 268 (3) (2003) 581-599.

LAMPIRAN



Assumption $\delta R \ll R$ narrow gap

$$R_e = \frac{\rho V \cdot \delta R}{\mu} \ll 1$$

$$V_r \sim O(V)$$

Order estimation $\theta \sim O(\delta)$

$$\gamma \sim O(R)$$

From eq. (3), $0 \left(\frac{\delta}{\delta \gamma} (\gamma v_r) \right) \sim 0 \left(\frac{\delta v \theta}{\delta \theta} \right)$

$$\frac{V_\theta}{V_r} \sim 0(\theta) \sim 0(\delta) \longrightarrow V_\theta \ll V_r$$

$$V_\theta \sim 0(\delta V)$$

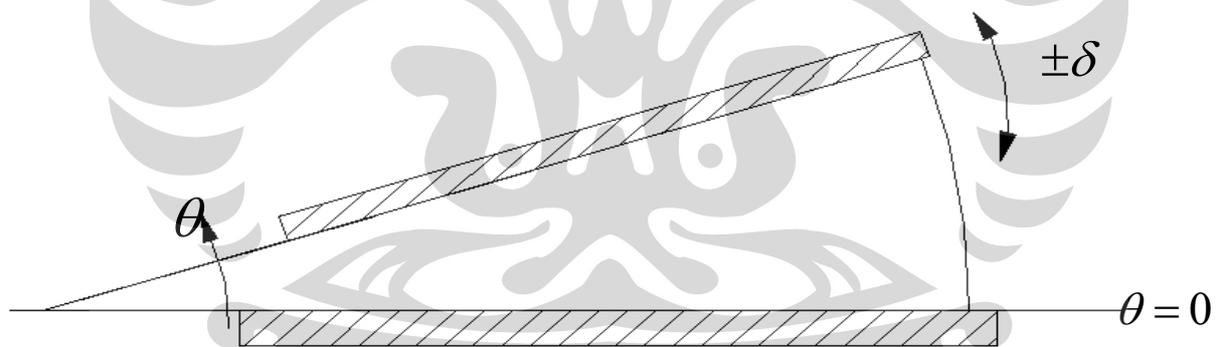
Pressure term $\frac{\delta P}{\delta r} \sim 0$ (viscous term)

Eq. 1 :

$$0 = -\frac{\delta P}{\delta r} + \mu \left[\frac{\delta}{\delta r} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\delta}{\delta r} (rVr) \right\} + \frac{1}{r^2} \frac{\delta^2 V r}{\delta \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\delta V \theta}{\delta \theta} \right]$$

Order	$\frac{\mu V}{R^2}$	$\frac{\mu V}{R^2 \delta^2}$	$\frac{\mu V}{R^2} \frac{\delta V}{\delta}$
$x(R^2 \delta^2 / \mu V)$	δ^2	1	δ^2

Thus,
$$0 = -\frac{\delta P}{\delta r} + \frac{\mu}{R^2} \frac{\delta^2 V r}{\delta \theta^2}$$



$$\frac{\delta}{\delta r} \left\{ \frac{1}{r} \left(-\frac{\delta V \theta}{\delta \theta} \right) \right\} + \frac{1}{r^2} \frac{\delta^2 V r}{\delta \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\delta V \theta}{\delta \theta}$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{\delta V \theta}{\delta \theta} - \frac{1}{r} \frac{\delta}{\delta r} \left(\frac{\delta V \theta}{\delta \theta} \right) + \dots - \dots$$

Pipa Bulat (r,θ,z), stoke approximation $\frac{\delta}{\delta Z} = 0$

$$\rho \frac{\delta V_r}{\delta t} = -\frac{\delta P}{\delta r} + \mu \left[\frac{\delta}{\delta r} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\delta}{\delta r} (r V_r) \right\} + \frac{1}{r^2} \frac{\delta^2 V_r}{\delta \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\delta V_\theta}{\delta \theta} \right] \quad (1)$$

$$\rho \frac{\delta V_\theta}{\delta t} = -\frac{1}{r} \frac{\delta P}{\delta \theta} + \mu \left[\frac{\delta}{\delta r} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\delta}{\delta r} (r V_\theta) \right\} + \frac{1}{r^2} \frac{\delta^2 V_\theta}{\delta \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\delta V_r}{\delta \theta} \right] \quad (2)$$

$$\frac{\delta}{\delta r} (r V_r) + \frac{\delta V_\theta}{\delta \theta} = 0 \quad (3)$$

Boundary Condition

$$\begin{aligned} \theta = 0 & : V_\theta = 0 \\ \theta = \pm \delta & : V_\theta = \pm r \frac{d\delta}{dt}, \quad V_r = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

From e.q. (3)

$$-\int_{-\delta}^{\delta} \frac{\delta V_\theta}{\delta \theta} d\theta = \int_{-\delta}^{\delta} \frac{\delta}{\delta r} (r V_r) d\theta \quad (5)$$

From e.q. (1)

$$\frac{\delta^2 V_r}{\delta \theta^2} = \frac{r^2}{\mu} \frac{\delta P}{\delta r}; V_r = \frac{1}{\mu} \frac{\delta P}{\delta r} r^2 \left(\frac{1}{2} \theta^2 + C_1 \theta + C_2 \right)$$

$$\theta = \pm \delta, \quad V_r = 0 \quad C_1 = 0 \quad C_2 = -\frac{1}{2} \varepsilon^2$$

$$V_r = -\frac{\delta^2}{2\mu} \frac{\delta P}{\delta r} r^2 \left\{ 1 - \left(\frac{\theta}{\delta} \right)^2 \right\} \quad (6)$$

e.q.(6) e.q. (5)

$$\begin{aligned} -2r \frac{d\delta}{dt} &= \int_{-\delta}^{\delta} \frac{\delta}{\delta r} \left(-\frac{\delta^2}{2\mu} \frac{\delta P}{\delta r} r^3 \right) \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{\theta}{\delta} \right)^2 \right\} d\theta \\ &= -\frac{\delta^2}{2\mu} \frac{\delta}{\delta r} \left(\frac{\delta P}{\delta r} r^3 \right) \cdot \delta \left[\xi - \frac{1}{3} \xi^3 \right]_{\xi=-1}^1 \\ &= -\frac{2\delta^3}{3\mu} \frac{\delta}{\delta r} \left(\frac{\delta P}{\delta r} r^3 \right) \end{aligned}$$

$$\frac{\delta}{\delta r} \left(\frac{\delta P}{\delta r} r^3 \right) = 2r \frac{d\delta}{dt} \times \frac{3\mu}{2\delta^3} = \frac{3\mu r}{\delta^3} \frac{d\delta}{dt}$$

$$\frac{\delta P}{\delta r} r^3 = \frac{3\mu}{2\delta^3} r^2 \frac{d\delta}{dt} + C_1$$

$$\frac{\delta P}{\delta r} = \frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \frac{1}{r} + \frac{C_1}{r^3}$$

$$P = \frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \ln r - \frac{C_1}{2r^2} + C_2$$

$$r = r_i, r_0 \quad P = P_0$$

$$P_0 = \frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \ln r_i - \frac{C_1}{2r^2} + C_2$$

$$P_0 = \frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \ln r_o - \frac{C_1}{2r_o^2} + C_2$$

$$0 = -\frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \ln \frac{r_o}{r_i} - \frac{C_1}{2} \left(\frac{1}{r_i^2} - \frac{1}{r_o^2} \right)$$

$$C_1 = -\frac{3\mu}{\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \ln \frac{r_o}{r_i} \times \frac{r_o^2}{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2 - 1}$$

$$C_2 = P_0 - \frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \ln r_i - \frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \ln \frac{r_o}{r_i} \times \frac{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2}{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2 - 1}$$

$$= P_0 - \frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \times \left\{ \frac{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2}{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2 - 1} \ln \frac{r_o}{r_i} + \ln r_i \right\}$$

$$P = \frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \ln r + \frac{1}{2r_o^2} \cdot \frac{3\mu}{\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \frac{r_o^2}{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2 - 1} \ln \frac{r_o}{r_i}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \times \left\{ \frac{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2}{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2 - 1} \ln \frac{r_o}{r_i} + \ln r_i \right\} + P_0 \\
&= \frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \ln \frac{r}{r_i} + \frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \frac{\left(\frac{r_o}{r}\right)^2 - \left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2}{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2 - 1} \ln \frac{r_o}{r_i} + P_0 \\
&= \frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \left\{ \ln \frac{r}{r_i} - \frac{\left(\frac{r_o}{r}\right)^2 - \left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2}{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2 - 1} \ln \frac{r_o}{r_i} \right\} + P_0 \\
&= \frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \left\{ \ln \frac{r}{r_i} - \frac{1 - \left(\frac{r_i}{r}\right)^2}{1 - \left(\frac{r_i}{r_o}\right)^2} \ln \frac{r_o}{r_i} \right\} + P_0
\end{aligned}$$

$$I_1 = \int_{r_i}^{r_o} \ln \frac{r}{r_i} dr = r_i \int_1^\alpha \ln \xi d\xi = r_i [\xi \ln \xi - \xi]_1^\alpha$$

$$= r_i (\alpha \ln \alpha - \alpha + 1)$$

$$I_2 = \int_{r_i}^{r_o} \ln \left(\frac{r}{r_i} \right)^2 dr = r_i \int_1^\alpha \frac{d\xi}{\xi^2} = -r_i \left[\frac{1}{\xi} \right]_1^\alpha = r_i \left(1 - \frac{1}{\alpha} \right) = r_i \frac{\alpha - 1}{\alpha}$$

$$I_3 = \int_{r_i}^{r_o} dr = r_o - r_i = r_i (\alpha - 1)$$

$$F = \int_{r_i}^{r_o} P dr = \frac{3\mu r_i}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \left\{ (\alpha \ln \alpha - \alpha + 1) - \frac{(\alpha - 1) - \left(\frac{\alpha - 1}{\alpha} \right) \ln \alpha}{1 - \alpha^{-2}} \right\} + r_i (\alpha - 1) P_0$$

$$= \frac{3\mu r_i}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \left\{ (\alpha \ln \alpha - \alpha + 1) - \frac{\alpha(\alpha - 1)}{\alpha + 1} \ln \alpha \right\} + r_i (\alpha - 1) P_0$$

$$= r_i (\alpha - 1) \left[\frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \left\{ \frac{\alpha(\alpha + 1 - \alpha + 1)}{(\alpha + 1)(\alpha - 1)} \ln \alpha - 1 \right\} + P_0 \right]$$

$$= r_i (\alpha - 1) \left[\frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \left\{ \frac{2\alpha}{(\alpha^2 - 1)} \ln \alpha - 1 \right\} + P_0 \right]$$

$$\delta = \delta_0 + \varepsilon \sin \omega t, \quad \frac{d\delta}{dt} = \varepsilon \omega \cos \omega t$$

$$F = (\alpha - 1)r_i \left[\frac{3\mu\omega\varepsilon}{2\delta^3} \left\{ \frac{2\alpha}{(\alpha^2 - 1)} \ln \alpha - 1 \right\} \cos \omega t + P_0 \right]$$

$$= (r_0 - r_i)r_i \left[\frac{3\mu\omega\varepsilon}{2\delta^3} \left\{ \frac{2\alpha}{(\alpha^2 - 1)} \ln \alpha - 1 \right\} \cos \omega t + P_0 \right]$$

$$F = \frac{\mu r_i}{\delta^3} \frac{d\delta}{dt} f(\alpha) \quad t.F = \int_0^t |F| dt$$

$$= -2 \int_{d_0 - \varepsilon}^{d_0 - \varepsilon} \frac{\mu r_i}{\delta^3} f(\alpha) d\delta = \left[\frac{\mu r_i}{\delta^2} f(\alpha) \right]_{d_0 - \varepsilon}^{d_0 - \varepsilon}$$

$$\omega T = 2\pi, T = \frac{2\pi}{\omega}$$

$$F = -\frac{\omega}{2\pi} \mu r_i f(\alpha) \left[\frac{1}{(\delta_0 - \varepsilon)^2} - \frac{1}{(\delta_0 + \varepsilon)^2} \right] = \frac{-2\mu r_i \omega \varepsilon \delta_0 f(\alpha)}{\pi (\delta_0 - \varepsilon)^2 (\delta_0 + \varepsilon)^2}$$

$$\frac{\delta P}{\delta r} = \frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \frac{1}{r} - \frac{1}{r^3} \frac{3\mu}{\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \ln \frac{r_o}{r_i} \times \frac{r_o^2}{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2 - 1}$$

$$= \frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \frac{1}{r} \left\{ 1 - \frac{2\left(\frac{r_o}{r}\right)^2}{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2 - 1} \ln \frac{r_o}{r_i} \right\}$$

$$V_r = -\frac{\delta^2}{2\mu} \frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \frac{1}{r} \left\{ 1 - \frac{2\left(\frac{r_o}{r}\right)^2}{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2 - 1} \ln \frac{r_o}{r_i} \right\} r^2 \left\{ 1 - \left(\frac{\theta}{\delta}\right)^2 \right\}$$

$$= -\frac{3\mu}{4\delta} \frac{d\delta}{dt} \left\{ 1 - \frac{2\left(\frac{r_o}{r}\right)^2}{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2 - 1} \ln \frac{r_o}{r_i} \right\} \times r \left\{ 1 - \left(\frac{\theta}{\delta}\right)^2 \right\}$$

$$r = r_o, \quad \theta = 0$$

$$V_r = -\frac{3r_o}{4\delta} \frac{d\delta}{dt} \left(1 - \frac{2 \ln \alpha}{\alpha^2 - 1} \right)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \varepsilon \omega$$

$$V_{r_{\max}} = -\frac{3r_o \omega \varepsilon}{4\delta} \left(1 - \frac{2 \ln \alpha}{\alpha^2 - 1} \right)$$

$$R_e = \frac{\rho V_{r_{\max}} r_o \delta}{\mu} = \frac{\rho \delta}{\mu} \cdot \frac{3r_o \omega \varepsilon}{4\delta} \left(1 - \frac{2 \ln \alpha}{\alpha^2 - 1} \right)$$

$$= \frac{\rho r_o^2 \omega \varepsilon}{\mu} \times \frac{3}{4} \left(1 - \frac{2 \ln \alpha}{\alpha^2 - 1} \right)$$

Jadi, jika kita ingin mendapatkan nilai R_e yang lebih rendah, maka nilai $\frac{\epsilon}{\delta}$ harus kita turunkan juga.

Apabila kita ingin memperoleh nilai F yang besar, maka nilai δ pada sampel harus kita turunkan atau dapat juga dengan menurunkan nilai r_i

